

Оценка возможностей акустического анализа голоса

И.С. Тимербулатов[✉], <https://orcid.org/0009-0000-6120-6393>, timerbulatov-i@mail.ru

Е.Е. Савельева, <https://orcid.org/0000-0002-2009-8469>, surdolog@yandex.ru

Р.М. Пестова, <https://orcid.org/0000-0001-5402-273X>, aisha_prm@mail.ru

И.И. Загидуллина, <https://orcid.org/0009-0005-8043-7695>, ilzia.zagid7997@yandex.ru

Р.С. Тимербулатов, <https://orcid.org/0009-0001-8392-8394>, yfhhfjfdc@gmail.com

Башкирский государственный медицинский университет; 45008 Россия, Уфа, ул. Ленина, д. 3

Резюме

Введение. Расстройство голоса встречается примерно у 30% жителей стран. К наиболее изучаемым характеристикам голоса относятся: основная частота, показатели высоты тона и амплитуды, соотношение гармоник к шуму, выраженность кепстрального пика, индекс акустического качества голоса, максимальное время фонации, вариации основной частоты и количество пауз речевых сигналов.

Цель. Провести литературный обзор оценки возможности акустического анализа голоса у пациентов с дисфониями.

Материалы и методы. Авторы провели поиск публикаций в электронных базах данных PubMed, Web of Science, Google Scholar и ELibrary. Поиск проводился по следующим ключевым словам: "voice acoustic analysis", "voice disorder", "artificial neural network", "dysphonia", "standard deviation of fundamental frequency", "voice quality", «акустический анализ голоса».

Результаты и обсуждение. Основная частота может обладать более высокой чувствительностью в отношении объективной клинической оценки голоса, чем высота тона и амплитуда. Выраженность кепстрального пика является неотъемлемой частью акустического анализа голоса, способствующей определению различий между дисфоническим и нормальным голосом. Кепстральный анализ более чувствителен к слабовыраженным дисфоническим изменениям, чем методы анализа гласных. Несмотря на высокую аналитическую точность, удобство использования машинного обучения, а также перспективность данного подхода в диагностике дисфонии, клиническое применение данной технологии требуют дальнейших исследований.

Выводы. Акустический анализ голоса обладает такими преимуществами, как неинвазивность, низкая стоимость и удобство использования, позволяя получить объективные данные для оценки выраженности нарушений голоса и являясь незаменимым методом для выявления патологий, сопровождающихся нарушением фонации. Наиболее информативными параметрами акустического анализа голоса, по данным литературы, являются: параметры основной частоты, показатели высоты тона и амплитуды, выраженность пиков при кепстральном анализе, индекс акустического качества голоса, максимальное время фонации, относительный уровень шума в речевом сигнале.

Ключевые слова: акустический анализ голоса, дисфония, качество голоса, высота тона, амплитуда тона, основная частота, выраженность кепстрального пика, машинное обучение

Для цитирования: Тимербулатов ИС, Савельева ЕЕ, Пестова РМ, Загидуллина ИИ, Тимербулатов РС. Оценка возможностей акустического анализа голоса. *Медицинский совет.* 2025;(7):185–190. <https://doi.org/10.21518/ms2025-029>.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Assessment of the possibility of acoustic voice analysis

Ilgiz S. Timerbulatov[✉], <https://orcid.org/0009-0000-6120-6393>, timerbulatov-i@mail.ru

Elena E. Savelieva, <https://orcid.org/0000-0002-2009-8469>, surdolog@yandex.ru

Rimma M. Pestova, <https://orcid.org/0000-0001-5402-273X>, aisha_prm@mail.ru

Ilziya I. Zagidullina, <https://orcid.org/0009-0005-8043-7695>, ilzia.zagid7997@yandex.ru

Rail S. Timerbulatov, <https://orcid.org/0009-0001-8392-8394>, yfhhfjfdc@gmail.com

Bashkir State Medical University; 3, Lenin St., Ufa, 45008, Russia

Abstract

Introduction. Voice disorders occur in approximately 30% of the country's population. The most studied characteristics of the voice include fundamental frequency, pitch and amplitude, harmonic-to-noise ratio, cepstral peak severity, acoustic quality index of voice, maximum phonation time, variations in fundamental frequency and number of pauses in speech signals.

Aim. Literature review assessing the possibility of acoustic voice analysis in patients with dysphonia.

Materials and methods. The authors searched for publications in the electronic databases PubMed, Web of Science, Google Scholar and ELibrary. The search was carried out using the following keywords: "voice acoustic analysis", "voice disorder", "artificial neural network", "dysphonia", "standard deviation of fundamental frequency", "voice quality", "acoustic voice analysis".

Results and discussion. Fundamental frequency may be more sensitive to objective clinical assessment of voice than pitch and amplitude. The severity of the cepstral peak is an integral part of the acoustic analysis of the voice, helping to determine

the differences between dysphonic and normal voices. Cepstral analysis is more sensitive to subtle dysphonic changes than vowel analysis methods. Despite the high analytical accuracy, ease of use of machine learning, as well as the promise of this approach in the diagnosis of dysphonia, the clinical application of this technology requires further research

Conclusions. Acoustic Analysis of Voice offers numerous advantages such as non-invasiveness, cost-effectiveness, and ease of use, facilitating the acquisition of objective data for evaluating the severity of voice disorders and serving as an indispensable tool for identifying pathologies associated with phonation disturbances. According to the literature, the most informative Acoustic Analysis of Voice parameters include fundamental frequency metrics, pitch and amplitude indices, cepstral peak prominence, voice quality index, maximum phonation time, and the relative noise level in the speech signal.

Keywords: acoustic voice analysis, dysphonia, voice quality, pitch, tone amplitude, fundamental frequency, cepstral peak severity, machine learning

For citation: Timerbulatov IS, Savelieva EE, Pestova RM, Zagidullina II, Timerbulatov RS. Assessment of the possibility of acoustic voice analysis. *Meditinskiy Sovet*. 2025;(7):185–190. (In Russ.) <https://doi.org/10.21518/ms2025-029>.

Conflict of interest: the authors declare no conflict of interest.

ВВЕДЕНИЕ

Расстройство голоса встречается примерно у 30% жителей стран [1]. Проблемы с голосом приводят как к экономическому, так и к социальному ущербу, включая увеличение числа случаев депрессии и снижение качества жизни. Несмотря на эти экономические и социальные последствия, лишь незначительное меньшинство (примерно 10%) людей с проблемами голоса обращаются за лечением [1, 2]. Основным звеном образования голоса являются голосовые связки, меняющие положение в зависимости от напряжения мышц гортани. Выступая в ее полость, они образуют голосовую щель. Поток выдыхаемого воздуха обуславливает колебание голосовых складок и образование турбулентного потока воздуха, прорывающегося через закрытую голосовую щель, в результате чего возникают звуковые колебания, поступающие в полость глотки, носа и рта. Проходя ротовую полость, голосовая волна подвергается изменениям, обусловленным наличием неба, языка, губ, меняющим свое положение благодаря сократительной способности мышц. Образованные каналы препятствуют свободному потоку голосовой волны, что способствует образованию звуков.

Расстройства голоса могут варьироваться от незначительного голосового дискомфорта, характеризующего функциональную дисфонию, до тяжелой афонии, развившейся вследствие злокачественных образований. Пол, возраст, а также род профессиональной деятельности могут являться факторами, предрасполагающими к нарушению голосообразования [2, 3].

Акустический анализ голоса (ААГ) является объективным, неинвазивным методом оценки голоса как при состояниях, ассоциируемых с нарушением его формирования, представленных ларингитами, ларингоспазмами, опухолями гортани, спастической дисфонией и параличом голосовых связок, так и без выявленных патологий [4–7].

ААГ представляет большой интерес для фониатров и клиницистов, что обусловлено неинвазивностью, низкой стоимостью и простотой применения [4]. В 2001 г. Европейское ларингологическое общество (ЕЛО) предложило базовый протокол для оценки заболеваний, связанных с голосом, в котором рекомендовало использование АГГ в качестве диагностического инструмента. В протоколе

были отмечены основная частота (ОЧ), показатели высоты тона и амплитуды, а также соотношение гармоник к шуму как значимые параметры при оценке качества голоса [5]. К наиболее изучаемым характеристикам голоса относятся: выраженность пиков при кепстральном анализе (CPP – cepstral peak prominence); индекс акустического качества голоса (AVQI – the Acoustic Voice Quality Index), который позволяет объективно оценить степень тяжести дисфонии с помощью устойчивых гласных и непрерывной речи; максимальное время фонации (МВФ), относительный уровень шума в речевом сигнале (HNR – Harmonic to Noise Ratio) [8].

Цель исследования – провести литературный обзор оценки возможности ААГ у пациентов с дисфониями.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Авторы провели поиск публикаций в электронных базах данных PubMed, Web of Science, Google Scholar и ELibrary. Поиск проводился по следующим ключевым словам: “voice acoustic analysis”, “voice disorder”, “artificial neural network”, “dysphonia”, “standard deviation of fundamental frequency”, “voice quality”, «акустический анализ голоса». Все работы были опубликованы в период с 2015 по 2024 г. При необходимости исследователи проводили дополнительный поиск иной релевантной литературы, касающейся клинического значения акустического анализа голоса.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Согласно имеющимся литературным данным, ААГ позволяет исследовать ОЧ, высоту и амплитуду тона. В 2016 г. L.W. Lopes et al. исследовали точность акустических показателей для дифференцировки пациентов с различными заболеваниями гортани [9]. Они обнаружили, что ОЧ является оптимальным параметром для выявления различий между узелками голосовых связок и их односторонним параличом или нарушениями голоса, вызванными гастроэзофагеальным рефлюксом, а также между полипами гортани и бороздами голосовых складок. Показатель высоты тона продемонстрировал высокую точность в дифференциальной диагностике между узелками голосовых связок и бороздами голосовых складок, а сочетанный анализ ОЧ

и амплитуды способствовал выявлению одностороннего паралича голосовых связок. Впоследствии, основываясь на гораздо большей когорте, авторы предположили, что комбинированные методы акустического анализа могут облегчить определение патологических изменений голоса у пациентов с дисфонией [9].

В исследовании, посвященном оценке влияния курения на акустические параметры голоса, M.R. Ayoub et al. не обнаружили статистически значимых изменений основной частоты и амплитуды, однако среднее значение первого показателя было значительно снижено у курильщиков [10].

J. Searl et al. сравнили акустические параметры до и после выполнения лечебных процедур у пациентов с болезнью Паркинсона и отметили, что интенсивность голоса значительно увеличилась после лечения, в то время как основная частота не претерпела значительных изменений [11].

Ряд исследовательских групп пришел к выводу, что амплитуда тона и относительного уровня шума в речевом сигнале (ОСШ) связаны с риском аспирации у пациентов с нарушениями глотания, а односторонний паралич голосовых связок может вызывать значительные изменения различных акустических параметров, включая среднее значение ОЧ, высоты, амплитуды тона и ОСШ [12, 13].

Описанные акустические параметры показали свою перспективность, до сих пор существует мало данных, сравнивающих клиническую значимость ОЧ, высоты, амплитуды тона. Проведенные исследования свидетельствуют о том, что ОЧ может обладать более высокой чувствительностью в отношении объективной клинической оценки голоса, чем высота, амплитуда тона, хотя убедительных доказательств по-прежнему не хватает.

J.Y. Lim et al. исследовали акустические и электроглоттографические характеристики у пациентов с дисфонией до и после курса лечения вокалотерапией и обнаружили снижение высоты тона и качественных характеристик [14]. Та же группа авторов в другом исследовании пришла к выводу о том, что использование таких параметров, как амплитуда тона и ОСШ, облегчают объективную оценку тяжести нарушения голосообразования до и после операции у пациентов с отеком Рейнке [15]. В рамках исследования пациентов с расщелиной неба было выявлено значительное повышение уровня основной частоты у пациентов с данной патологией по сравнению с контрольной группой. Также было отмечено значительное увеличение амплитуды тона у пациентов с небно-глоточной недостаточностью [16]. Однако в ходе недавнего исследования M. Segura-Hernandez et al., также проводивших акустический анализ детей с аналогичными патологиями, статистически значимых различий основной частоты между пациентами и контрольной группой выявлено не было. Кроме того, было отмечено значительное увеличение высоты и амплитуды тона у всех пациентов в начале лечения и их снижение по окончании терапии [17]. Эти результаты указывают на то, что данные показатели более чувствительны, чем основная частота. Стоит отметить, что во всех вышеупомянутых исследованиях не изучалось стандартное отклонение основной частоты.

Данные исследований пуберфонии свидетельствуют о нестабильности контроля голоса у исследуемых данной группы. Оценка результатов лечения с помощью перцептивного и акустического анализа выявила снижение ОЧ, высоты и амплитуды тона [18]. Анализ стандартного отклонения ОЧ проведен не был. Также было отмечено отсутствие существенной разницы высоты и амплитуды тона при произношении устойчивых гласных звуков, в то время как стандартное отклонение ОЧ выявило значительные изменения [9]. Дальнейший анализ показал, что исследуемые параметры различаются между группой пациентов с карциномой или полипами гортани и контрольной группой [9]. Полученные данные свидетельствуют о том, что пуберфония отличается от органических заболеваний гортаноглотки. Протекающие при них патофизиологические процессы приводят к различным акустическим изменениям.

Работы в области ААГ все больше приходят к выводу, что выраженность кепстрального пика (ВКП) является объективным показателем дисфонии. В 2018 г. руководство Американской ассоциации логопедов (ASHA) рекомендовало данный метод как инструмент для оценки выраженности дисфонии [19]. Благодаря данной рекомендации ВКП присоединяется к используемым ранее методам ААГ, включающим ОЧ, высоту, амплитуду тона и ОСШ. Данные показатели уступают кепстральному анализу, что обусловлено возможностью получения лишь устойчивых гласных, и может быть ненадежным при низкой степени выраженности дисфонии. В отличие от них данные ВКП могут быть получены из связной речи и устойчивых гласных и не требуют подсчета среднего значения основной частоты.

Все больше работ демонстрируют способность ВКП дифференцировать голоса с дисфоническими изменениями и без них в разных языковых группах, включающих английский, турецкий, корейский, испанский, и при различных типах расстройств [20–22]. Результаты данных исследований декларируют о том, что более низкие значения ВКП коррелируют с увеличением тяжести дисфонии. Однако клиническое применение метода ограничено ввиду отсутствия рекомендаций, указывающих на референсные значения, объективно отражающие дисфонию.

Кепстральный анализ основан на временной области с сигналом, являющимся зависимостью амплитуды от времени. Для видоизменения сигнала от временного типа к частотному используется интегральное преобразование Фурье, которое делит каждый фрагмент на равные по длительности отрезки, что позволяет создавать спектральные диаграммы, позволяющие оценивать фонацию [23].

С целью выявления изменений фонации непрерывный диапазон значений ВКП следует разделять на группы с одним или несколькими пороговыми значениями. Каждый потенциальный порог может давать различную чувствительность и специфичность, поэтому для любого тестирования следует выбрать такой порог, чтобы количество и тип ошибок были приемлемыми для целей данного теста.

К основным параметрам, используемым в настоящее время для ААГ, относят индекс выраженности дисфонии (DSI), рассчитываемый на основе ОЧ для оценки

непрерывных гласных в рамках логопедической терапии, кепстральный спектральный индекс дисфонии (CSIDE), включающий положение кепстрального пика и его стандартное отклонение, индекс акустического качества голоса (AVQI), являющийся многопараметрическим показателем качества голоса, полученным на основе расчета 6 акустических параметров, и индекс акустического дыхания (ABI), оценивающий уровень шума воздушного потока, определяемый на основе 9 акустических показателей [24, 25]. CSIDE, AVQI и ABI могут быть использованы для анализа непрерывных гласных и непрерывной речи.

По данным нескольких диагностических тестов, контролируемых субъективной оценкой или результатами ларингоскопии, диагностическая ценность каждого составного параметра при нарушениях голоса различна. S. Aghadoost et al. сравнили DSI с результатами индекса голосовых нарушений (VHI) у пациентов с нарушениями голоса и обнаружили отсутствие корреляции между ними [25]. M. Englert et al. пришли к выводу о том, что AVQI и ABI коррелируют с VHI [26]. J.M. Lee et al. выявили более сильную корреляцию между CSID и оценкой субъективного слухового восприятия по сравнению с AVQI. AVQI был определен как параметр, способный с высокой точностью оценить качество голоса и имеющий потенциал для использования в клинической практике [27].

В научной литературе имеется ряд исследований, посвященных определению порогового значения ВКП. M. Yu et al. считают, что данный показатель должен быть выше 12 дБ при произношении гласных и 7 дБ – в разговорной речи у носителей корейского языка [28]. Данный уровень порогов несколько ниже, чем у J. Delgado-Hernández et al., чьи результаты продемонстрировали минимальное значение CPP, равное 13,96 дБ для гласных и 8,37 дБ – для непрерывной речи [29].

В заключение следует отметить, что CPP является неотъемлемой частью ААГ, способствующей определению различий между дисфоничным и нормальным голосом. Кепстральный анализ более чувствителен к слабовыраженным дисфоническим изменениям, чем методы, основанные на анализе гласных.

За последнее десятилетие было исследовано несколько алгоритмов машинного обучения (МО), целью которых являлось определение нарушений голоса. Согласно литературным данным, МО может с высокой точностью выявлять дисфонические изменения, что позволяет говорить о потенциальной помощи врачам в анализе и оценке результатов лечения расстройств, сопровождающихся нарушением фонации [30, 31]. Однако, несмотря на многочисленные исследования, ни один из алгоритмов не оказался достаточно надежным для применения в клинических условиях [30]. Несмотря на высокую аналитическую точность, удобство использования МО, а также перспективность данного подхода в диагностике дисфонии, клиническое применение данной технологии требует дальнейших исследований.

Роль применения МО и искусственного интеллекта была продемонстрирована в исследованиях, изучающих логоневроз, хоть и основным методом в диагностике

данного состояния, по мнению авторов, является спектральный анализ [32–34]. При этом стоит отметить, что стандартный акустический анализ не позволяет динамически комбинировать выбранные признаки, извлеченные из большого набора данных, и не обладает возможностью самообучения и совершенствования на основе имеющихся баз данных. Изменения акустических характеристик, наблюдаемых по ходу лечения данного состояния, чаще всего определяются посредством немедикаментозных подходов, основывающихся на посещениях логопеда или применении устройств, замедляющих темп речи благодаря наличию слуховой обратной связи [35]. F. Asci et al. в исследовании логоневроза выявили значимые клинико-инструментальные зависимости: чем выше значения коэффициента правдоподобия, используемого для оценки ценности выполнения диагностического теста, полученного с помощью МО, тем выше тяжесть симптомов логоневроза. Таким образом, было продемонстрировано, что степень изменения голоса у пациентов с логоневрозом коррелирует с тяжестью заболевания, а значения коэффициента правдоподобия могут считаться надежными показателями для выражения тяжести данного состояния [36].

P. Mahajan et al., использовавшие МО, включающее алгоритмы самообучения с целью повышения эффективности обнаружения дисфонических изменений у пациентов с болезнью Альцгеймера, выявили повышение точности определения акустических изменений на 2% [37].

Z. Ren et al. провели исследование акустических характеристик кашля у пациентов с COVID-19, целью которого являлось создание модели, способной предположить наличие или отсутствие данной патологии у людей [38]. Было выявлено, что несколько характеристик кашля, проанализированных и выявленных с помощью МО, чаще встречаются у пациентов с COVID-19, что может стать дополнительной мерой диагностики данной патологии [38].

ВЫВОДЫ

ААГ обладает такими преимуществами, как неинвазивность, низкая стоимость и удобство использования, позволяя получить объективные данные для оценки выраженности нарушений голоса и являясь незаменимым методом для выявления патологий, сопровождающихся нарушением фонации. Наиболее информативными параметрами ААГ, по данным литературы, являются: параметры основной частоты, показатели высоты тона и амплитуды, выраженность пиков при кепстральном анализе, индекс акустического качества голоса, максимальное время фонации, относительный уровень шума в речевом сигнале. Кроме того, ААГ можно применять для оценки результатов лечения ряда заболеваний как при органических (различные формы ларингитов, новообразования, парезы, параличи и т. д.), так и функциональных (гипотонусные, гипертонусные, смешанные, спастические дисфонии) заболеваниях гортани.



Поступила / Received 03.05.2024
Поступила после рецензирования / Revised 21.05.2024
Принята в печать / Accepted 04.02.2025

Список литературы / References

1. Lenell C, Shao Q, Johnson AM. Identifying Concomitant Health Conditions in Individuals With Chronic Voice Problems. *J Voice*. 2021;35(5):810.e1–810.e5. <https://doi.org/10.1016/j.jvoice.2020.01.007>.
2. Cohen SM, Kim J, Roy N, Asche C, Courey M. Prevalence and causes of dysphonia in a large treatment-seeking population. *Laryngoscope*. 2012;122(2):343–348. <https://doi.org/10.1002/lary.22426>.
3. Gunjawate DR, Chacon AM, Nguyen DD, Madill C. Vocal tasks for acoustic and/or auditory perceptual analysis for discriminating individuals with and without voice disorders: a systematic review protocol. *BMJ Open*. 2023;13(12):e077398. <https://doi.org/10.1136/bmjopen-2023-077398>.
4. Gorris C, Ricci Maccarini A, Vanoni F, Poggioli M, Vaschetto R, Garzaro M et al. Acoustic Analysis of Normal Voice Patterns in Italian Adults by Using Praat. *J Voice*. 2020;34(6):961.e9–961.e18. <https://doi.org/10.1016/j.jvoice.2019.04.016>.
5. Lee SH, Hong KH, Kim JS, Hong YT. Perceptual and Acoustic Outcomes of Early-Stage Glottic Cancer After Laser Surgery or Radiotherapy: A Meta-Analysis. *Clin Exp Otorhinolaryngol*. 2019;12(3):241–248. <https://doi.org/10.21053/ceo.2018.00990>.
6. Yang Y, Wang YL, Wei LZ, Wang JX, Huang FT, Huang GW. Is CO₂ laser micro-surgery better than radiotherapy in early glottic cancer: a meta-analysis. *Lasers Med Sci*. 2023;38(1):223. <https://doi.org/10.1007/s10103-023-03890-3>.
7. Старостина СВ, Свистушкин ВМ, Ракунова ЕБ. Послеоперационная реабилитация голоса у пациентов с доброкачественными и опухолеподобными заболеваниями гортани по данным акустического анализа. *Медицинский совет*. 2019;(8):122–126. <https://doi.org/10.21518/2079-701X-2019-8-122-126>.
8. Starostina SV, Svishtushkin VM, Rakunova EB. Rehabilitation of a voice function in patients with benign laryngeal lesions after surgical treatment. *Meditsinskiy Sovet*. 2019;(8):122–126. (In Russ.) <https://doi.org/10.21518/2079-701X-2019-8-122-126>.
9. Karlsson T, Sandvik L, Heimdal JH, Aarstad HJ. Acoustic Voice Analysis and Maximum Phonation Time in Relation to Voice Handicap Index Score and Larynx Disease. *J Voice*. 2020;34(1):161.e27–161.e35. <https://doi.org/10.1016/j.jvoice.2018.07.002>.
10. Lopes LW, Batista Simões L, Delfino da Silva J, da Silva Evangelista D, da Nóbrega E, Ugulino AC, Oliveira Costa Silva P et al. Accuracy of Acoustic Analysis Measurements in the Evaluation of Patients With Different Laryngeal Diagnoses. *J Voice*. 2017;31(3):382.e15–382.e26. <https://doi.org/10.1016/j.jvoice.2016.08.015>.
11. Ayoub MR, Larrouy-Maestri P, Morsomme D. The Effect of Smoking on the Fundamental Frequency of the Speaking Voice. *J Voice*. 2019;33(5):802.e11–802.e16. <https://doi.org/10.1016/j.jvoice.2018.04.001>.
12. Searl J, Wilson K, Haring K, Dietsch A, Lyons K, Pahwa R. Feasibility of group voice therapy for individuals with Parkinson's disease. *J Commun Disord*. 2011;44(6):719–732. <https://doi.org/10.1016/j.jcomdis.2011.05.001>.
13. Kang YA, Kim J, Jee SJ, Jo CW, Koo BS. Detection of voice changes due to aspiration via acoustic voice analysis. *Auris Nasus Larynx*. 2018;45(4):801–806. <https://doi.org/10.1016/j.anl.2017.10.007>.
14. Takatsu J, Higaki E, Abe T, Fujieda H, Yoshida M, Yamamoto M et al. Critical swallowing functions contributing to dysphagia in patients with recurrent laryngeal nerve paralysis after esophagectomy. *Esophagus*. 2024;21(2):111–119. <https://doi.org/10.1007/s10388-023-01041-9>.
15. Lim JY, Lim SE, Choi SH, Kim JH, Kim KM, Choi HS. Clinical characteristics and voice analysis of patients with mutational dysphonia: clinical significance of diplophonia and closed quotients. *J Voice*. 2007;21(1):12–19. <https://doi.org/10.1016/j.jvoice.2005.10.002>.
16. Lim JY, Choi JN, Kim KM, Choi HS. Voice analysis of patients with diverse types of Reinke's edema and clinical use of electroglottographic measurements. *Acta Otolaryngol*. 2006;126(1):62–69. <https://doi.org/10.1080/00016480510043927>.
17. Singh H, Maurya RK, Sharma P, Kapoor P, Mittal T, Atri M. Effects of maxillary expansion on hearing and voice function in non-cleft lip palate and cleft lip palate patients with transverse maxillary deficiency: a multicentric randomized controlled trial. *Braz J Otorhinolaryngol*. 2021;87(3):315–325. <https://doi.org/10.1016/j.bjorl.2019.09.010>.
18. Segura-Hernández M, Valadez-Jiménez VM, Ysunza PA, Sánchez-Valerio AP, Arch-Tirado E, Lino-González AL et al. Acoustic analysis of voice in children with cleft lip and palate following vocal rehabilitation. Preliminary report. *Int J Pediatr Otorhinolaryngol*. 2019;126:109618. <https://doi.org/10.1016/j.ijporl.2019.109618>.
19. Chen S, Han C, Wang S, Liu X, Wang B, Wei R et al. Hearing the physical condition: The relationship between sexually dimorphic vocal traits and underlying physiology. *Front Psychol*. 2022;13:983688. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2022.983688>.
20. Patel RR, Awan SN, Barkmeier-Kraemer J, Courey M, Deliyski D, Eadie T et al. Recommended Protocols for Instrumental Assessment of Voice: American Speech-Language-Hearing Association Expert Panel to Develop a Protocol for Instrumental Assessment of Vocal Function. *Am J Speech Lang Pathol*. 2018;27(3):887–905. https://doi.org/10.1044/2018_AJSLP-17-0009.
21. Delgado-Hernández J, León-Gómez N, Jiménez-Álvarez A. Diagnostic accuracy of the smoothed cepstral peak prominence (CPPS) in the detection of dysphonia in the Spanish language. *Loquens*. 2019;6(1):e058–e058.
22. Lee Y, Kim G, Kwon S. The Usefulness of Auditory Perceptual Assessment and Acoustic Analysis for Classifying the Voice Severity. *J Voice*. 2020;34(6):884–893. <https://doi.org/10.1016/j.jvoice.2019.04.013>.
23. Esen Aydinli F, Özcebe E, Incebay Ö. Use of cepstral analysis for differentiating dysphonic from normal voices in children. *Int J Pediatr Otorhinolaryngol*. 2019;116:107–113. <https://doi.org/10.1016/j.ijporl.2018.10.029>.
24. Randall RB. A history of cepstrum analysis and its application to mechanical problems. *Mech Syst Signal Process*. 2017;97:3–19.
25. Chernobelsky SI, Petrova IA. Evaluation of the results of treatment of patients with functional dysphonia using a cepstral test. *Vestn Otorinolaringol*. 2023;88(5):23–26. <https://doi.org/10.17116/otorino20238805123>.
26. Aghadoost S, Jalaie S, Dabirmoghaddam P, Khoddami SM. Effect of Muscle Tension Dysphonia on Self-perceived Voice Handicap and Multiparametric Measurement and Their Relation in Female Teachers. *J Voice*. 2022;36(1):68–75. <https://doi.org/10.1016/j.jvoice.2020.04.011>.
27. Englert M, Latoszek BBV, Behlau M. Exploring The Validity of Acoustic Measurements and Other Voice Assessments. *J Voice*. 2024;38(3):567–571. <https://doi.org/10.1016/j.jvoice.2021.12.014>.
28. Lee JM, Roy N, Peterson E, Merrill RM. Comparison of Two Multiparameter Acoustic Indices of Dysphonia Severity: The Acoustic Voice Quality Index and Cepstral Spectral Index of Dysphonia. *J Voice*. 2018;32(4):515.e1–515.e13. <https://doi.org/10.1016/j.jvoice.2017.06.012>.
29. Yu M. Predicting normal and pathological voice using a cepstral based acoustic index in sustained vowels versus connected speech. *Commun Sci Disord*. 2018;23(4):1055–1064. <https://doi.org/10.12963/csd.18550>.
30. Delgado-Hernández J, León-Gómez N, Jiménez-Álvarez A. Diagnostic accuracy of the smoothed cepstral peak prominence (CPPS) in the detection of dysphonia in the Spanish language. *Loquens*. 2019;6(1):e058–e058.
31. Gupta R, Gunjawate DR, Nguyen DD, Jin C, Madill C. Voice disorder recognition using machine learning: a scoping review protocol. *BMJ Open*. 2024;14(2):e076998. <https://doi.org/10.1136/bmjopen-2023-076998>.
32. Al-Hussain G, Shuweihdi F, Alali H, Househ M, Abd-Alrazaq A. The Effectiveness of Supervised Machine Learning in Screening and Diagnosing Voice Disorders: Systematic Review and Meta-analysis. *J Med Internet Res*. 2022;24(10):e38472. <https://doi.org/10.2196/38472>.
33. Bakhtiar M, Zhang C, Sze Ki S. Impaired processing speed in categorical perception: Speech perception of children who stutter. *PLoS ONE*. 2019;14(4):e0216124. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0216124>.
34. Maruthy S, Feng Y, Max L. Spectral Coefficient Analyses of Word-Initial Stop Consonant Productions Suggest Similar Anticipatory Coarticulation for Stuttering and Nonstuttering Adults. *Lang Speech*. 2018;61(1):31–42. <https://doi.org/10.1177/0023830917695853>.
35. Guttormsen LS, Kefalianos E, Næss KA. Communication attitudes in children who stutter: A meta-analytic review. *J Fluency Disord*. 2015;46:1–14. <https://doi.org/10.1016/j.jfludis.2015.08.001>.
36. Hickok G, Venezia J, Teghipco A. Beyond Broca: neural architecture and evolution of a dual motor speech coordination system. *Brain*. 2023;146(5):1775–1790. <https://doi.org/10.1093/brain/awac454>.
37. Asci F, Marsili L, Suppa A, Saggio G, Michetti E, Di Leo P et al. Acoustic analysis in stuttering: a machine-learning study. *Front Neurol*. 2023;14:1169707. <https://doi.org/10.3389/fneur.2023.1169707>.
38. Mahajan P, Baths V. Acoustic and Language Based Deep Learning Approaches for Alzheimer's Dementia Detection From Spontaneous Speech. *Front Aging Neurosci*. 2021;13:623607. <https://doi.org/10.3389/fnagi.2021.623607>.
39. Ren Z, Chang Y, Bartl-Pokorny KD, Pokorny FB, Schuller BW. The Acoustic Dissection of Cough: Diving Into Machine Listening-based COVID-19 Analysis and Detection. *J Voice*. 2024;38(6):1264–1277. <https://doi.org/10.1016/j.jvoice.2022.06.011>.

Вклад авторов:

Концепция и дизайн исследования – И.С. Тимербулатов

Написание текста – Р.М. Пестова, Р.С. Тимербулатов

Сбор и обработка материала – Е.Е. Савельева, Р.М. Пестова

Обзор литературы – И.С. Тимербулатов, Е.Е. Савельева, Р.М. Пестова, И.И. Загидуллина, Р.С. Тимербулатов

Анализ материала – И.С. Тимербулатов, Е.Е. Савельева

Статистическая обработка – И.И. Загидуллина

Редактирование – И.С. Тимербулатов, Р.С. Тимербулатов

Contribution of authors:*Study concept and design* – Ilgiz S. Timerbulatov*Text development* – Rimma M. Pestova, Rail S. Timerbulatov*Collection and processing of material* – Elena E. Savelieva, Rimma M. Pestova*Literature review* – Ilgiz S. Timerbulatov, Elena E. Savelieva, Rimma M. Pestova, Ilziya I. Zagidullina, Rail S. Timerbulatov*Material analysis* – Ilgiz S. Timerbulatov, Elena E. Savelieva*Statistical processing* – Ilziya I. Zagidullina*Editing* – Ilgiz S. Timerbulatov, Rail S. Timerbulatov**Информация об авторах:****Тимербулатов Ильгиз Салихович**, ассистент кафедры оториноларингологии, Башкирский государственный медицинский университет; 450008, Россия, Уфа, ул. Ленина, д. 3; timerbulatov-i@mail.ru**Савельева Елена Евгеньевна**, д.м.н., доцент, заведующая кафедрой оториноларингологии с курсом дополнительного профессионального образования, Башкирский государственный медицинский университет; 450008, Россия, Уфа, ул. Ленина, д. 3; surdolog@yandex.ru**Пестова Римма Маратовна**, ассистент кафедры оториноларингологии, Башкирский государственный медицинский университет; 450008, Россия, Уфа, ул. Ленина, д. 3; aisha_prm@mail.ru**Загидуллина Ильзия Ильшатовна**, ассистент кафедры оториноларингологии, Башкирский государственный медицинский университет; 450008, Россия, Уфа, ул. Ленина, д. 3; ilzia.zagid7997@yandex.ru**Тимербулатов Раиль Салихович**, студент, Башкирский государственный медицинский университет; 450008, Россия, Уфа, ул. Ленина, д. 3; yfhhfjjfdc@gmail.com**Information about the authors:****Ilgiz S. Timerbulatov**, Assistant of the Department of Otorhinolaryngology, Bashkir State Medical University; 3, Lenin St., Ufa, 45008, Russia; timerbulatov-i@mail.ru**Elena E. Savelieva**, Dr. Sci. (Med.), Associate Professor, Head of the Department of Otorhinolaryngology with the course of Medical Education, Bashkir State Medical University; 3, Lenin St., Ufa, 45008, Russia; surdolog@yandex.ru**Rimma M. Pestova**, Assistant at the Department of Otorhinolaryngology, Bashkir State Medical University; 3, Lenin St., Ufa, 45008, Russia; aisha_prm@mail.ru**Ilzia I. Zagidullina**, Assistant of the Department of Otorhinolaryngology, Bashkir State Medical University; 3, Lenin St., Ufa, 45008, Russia; ilzia.zagid7997@yandex.ru**Rail S. Timerbulatov**, Student, Bashkir State Medical University; 3, Lenin St., Ufa, 45008, Russia; yfhhfjjfdc@gmail.com