Вестник оториноларингологии
2021, Т. 86, №2, с. 66-72
https://doi.org/10.17116/otorino20218602166

Vestnik otorinolaringologii
2021, Vol. 86, No. 2, pp. 66-72
https://doi.org/10.17116/otorino20218602166

Перспективы пассивного акустического метода исследования в оториноларингологии

© Г.Ю. ЦАРАПКИН[1], С.Н. СЕРГЕЕВ[2], Н.Л. КУНЕЛЬСКАЯ[1, 3], Е.О. ЧЕРЕПАНОВ[2], С.Г. РОМАНЕНКО[1], Д.Ю. ОГОРОДНИКОВ[1, 3], А.Е. КИШИНЕВСКИЙ[1], Е.В. ГОРОВАЯ[1]

[1]ГБУЗ Москвы «Научно-исследовательский клинический институт оториноларингологии им. Л.И. Свержевского» Департамента здравоохранения Москвы, Москва, Россия;
[2]ФГУП «Научно-исследовательский институт прикладной акустики» ФСТЭК, Дубна, Россия;
[3]ФГАОУ ВО «Российский национальный исследовательский медицинский университет им. Н.И. Пирогова» Минздрава России, Москва, Россия

РЕЗЮМЕ

Авторами статьи выполнен обзор акустических методов исследования в оториноларингологии. Все акустические способы диагностики делятся на активные и пассивные. Активные акустические методы основаны на излучении акустических колебаний, в части случаев с последующим приемом и обработкой отраженных колебаний. Пассивные акустические методы исследования основаны на записи и анализе звуков, возникающих при физиологическом функционировании исследуемых органов и систем. В оториноларингологии большее распространение получили активные акустические методы: аудиометрия, акустическая импедансометрия, ультразвуковое исследование слуха, слуховые вызванные потенциалы, сонотубометрия, акустическая ринометрия, ультразвуковое исследование мягких тканей шеи и околоносовых пазух. Среди пассивных акустических методов исследования наибольшее развитие в клинической практике оториноларингологии получил компьютерный акустический анализ голоса — оценка фонаторной функции гортани. С использованием аналогичных технологий разработана методика акустического анализа носового дыхания — функциональная оценка наружного носового клапана. Отдельные группы авторов проводили экспериментальное изучение звуков, возникающих при открытии слуховой трубы. Достижения акустики и внедрение передовых технологий в медицине создают предпосылки для совершенствования существующих и разработки новых методов акустического анализа работы уха, горла и носа.

Ключевые слова: *акустика, аудиометрия, исследование слуха, звуковые колебания, компьютерный акустический анализ голоса.*

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:
Царапкин Г.Ю. — https://orcid.org/0000-0003-2349-7438; e-mail: tsgrigory@mail.ru
Сергеев С.Н. — https://orcid.org/0000-0002-2861-1642; e-mail: sergey.sergeev@niipa.ru
Кунельская Н.Л. — https://orcid.org/0000-0002-1001-2609; e-mail: nlkun@mail.ru
Черепанов Е.О. — https://orcid.org/0000-0003-3410-2024; e-mail: evgeny.cherepanov@niipa.ru
Романенко С.Г. — https://orcid.org/0000-0002-8202-5505; e-mail: s_romanenko@bk.ru
Огородников Д.Ю. — https://orcid.org/0000-0001-6086-1898; e-mail: rudino66@mail.ru
Кишиневский А.Е. — https://orcid.org/0000-0002-6700-3308; e-mail: alexander.kishinevskiy@mail.ru
Горовая Е.В. — https://orcid.org/0000-0003-2072-5415; e-mail: e.v.gorovaya@gmail.com
Автор, ответственный за переписку: Царапкин Г.Ю. — e-mail: tsgrigory@mail.ru

КАК ЦИТИРОВАТЬ:
Царапкин Г.Ю., Сергеев С.Н., Кунельская Н.Л., Черепанов Е.О., Романенко С.Г., Огородников Д.Ю., Кишиневский А.Е., Горовая Е.В. Перспективы пассивного акустического метода исследования в оториноларингологии. *Вестник оториноларингологии*. 2021;86(2):66–72. https://doi.org/10.17116/otorino20218602166

Prospects for a passive acoustic research method in otorhinolaryngology

© G.YU. TSARAPKIN[1], S.N. SERGEEV[2], N.L. KUNELSKAYA[1, 3], E.O. CHEREPANOV[2], S.G. ROMANENKO[1], D.YU. OGORODNIKOV[1, 3], A.E. KISHINEVSKY[1], E.V. GOROVAYA[1]

[1]L.I. Sverzhevskiy Research and Clinical Institute of Otorhinolaryngology, the Moscow Healthcare Department, Moscow, Russia;
[2]FGUP «Research Institute of Applied Acoustics», Dubna, Russia;
[3]N.I. Pirogov Russian National Research Medical University, Ministry of Health of the Russian Federation, Moscow, Russia

ABSTRACT

The authors of the article reviewed acoustic research methods in otorhinolaryngology. All acoustic diagnostic methods are divided into active and passive. Active acoustic methods are based on the emission of acoustic vibrations, in some cases with the subsequent reception and processing of reflected vibrations. Passive acoustic research methods are based on the recording and analysis of sounds arising during the physiological functioning of the studied organs and systems. In otorhinolaryngology, active acoustic methods of studying the ENT organ are more widespread: audiometry, acoustic impedance measurement, ultrasound examination of hearing, auditory evoked potentials, sonotubometry, acoustic rhinometry, ultrasound examination of soft tissues of the neck and paranasal sinuses. Among passive acoustic research methods, the greatest development in clinical practice in otorhinolaryngology was obtained by computer acoustic analysis of the voice — an assessment of the phonatory function of the larynx. Using similar technologies, a technique for acoustic analysis of nasal breathing was developed — a functional assessment of the external

nasal valve. Separate groups of authors have carried out an experimental study of the sounds that occur when the auditory tube is opened. Achievements in acoustics and the introduction of advanced technologies in medicine create prerequisites for improving existing and developing new methods of acoustic analysis of the work of ENT organs.

Keywords: *acoustics, audiometry, hearing assessment, sound vibrations, computer acoustic analysis of the voice.*

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:
Tsarapkin G.Yu. — https://orcid.org/0000-0003-2349-7438; e-mail: tsgrigory@mail.ru
Sergeev S.N. — https://orcid.org/0000-0002-2861-1642; e-mail: sergey.sergeev@niipa.ru
Kunelskaya N.L. — https://orcid.org/0000-0002-1001-2609; e-mail: nlkun@mail.ru
Cherepanov E.O. — https://orcid.org/0000-0003-3410-2024; e-mail: evgeny.cherepanov@niipa.ru
Romanenko S.G. — https://orcid.org/0000-0002-8202-5505; e-mail: s_romanenko@bk.ru
Ogorodnikov D.Yu. — https://orcid.org/0000-0001-6086-1898; e-mail: rudino66@mail.ru
Kishinevsky A.E. — https://orcid.org/0000-0002-6700-3308; e-mail: alexander.kishinevskiy@mail.ru
Gorovaya E.V. — https://orcid.org/0000-0003-2072-5415; e-mail: e.v.gorovaya@gmail.com
Corresponding author: Tsarapkin G.Yu. — e-mail: tsgrigory@mail.ru

TO CITE THIS ARTICLE:
Tsarapkin GYu, Sergeev SN, Kunelskaya NL, Cherepanov EO, Romanenko SG, Ogorodnikov DYu, Kishinevsky AE, Gorovaya EV. Prospects for a passive acoustic research method in otorhinolaryngology. *Bulletin of Otorhinolaryngology = Vestnik otorinolaringologii*. 2021;86(2):66–72. (In Russ.). https://doi.org/10.17116/otorino20218602166

Акустика — это область физики, исследующая упругие колебания и волны от самых низких до предельно высоких частот [1]. Акустические исследования можно разделить на несколько областей в зависимости от среды распространения звука (атмосферная акустика, гидроакустика, акустика твердых тел), от диапазона частот исследуемых волн и колебаний (инфразвуковые, звуковые, ультразвуковые, гиперзвуковые), от скорости распространения (акустические и ударные волны) и от области применения (в музыке, архитектуре, промышленности, обороне, биологии и медицине). Однако эта градация носит условный характер, поскольку границы перечисленных областей исследования акустики довольно размыты и часто пересекаются ввиду того, что являются частными случаями общей теории акустики, описывающей законы распространения упругих волн в неоднородных и динамических средах [1].

Изначально акустические исследования ограничивались изучением распространения в воздухе звуков, слышимых человеческим ухом. Становление акустики как науки произошло в XVII веке. В это время впервые измерена скорость звука в воздухе, описаны принципы волнового движения и установлены зависимости основных акустических параметров — частоты и амплитуды колебаний от размеров и степени деформации тела. Далее акустика развивалась как раздел механики: разработаны теория колебаний струн, стержней и пластинок, теория интерференции и дифракции волн, найдено объяснение происхождения обертонов и открыт закон изменения частоты волны при движении источника звука относительно наблюдателя. В ряду ученых, которые изучали акустику, имя немецкого физика, психолога и врача Г. Гельмгольца (Hermann von Helmholtz) занимает особое место. В 1863 г. Г. Гельмгольц на основе своей теории резонаторов дал первую физическую теорию уха как слухового аппарата. Исследования, проведенные Г. Гельмгольцем, заложили основу физиологической акустики. Следующий этап развития акустики связан с возникновением радиотехники, электромеханики и методов прямого и обратного преобразования акустических сигналов в электромагнитные, в результате чего созданы телефон (А. Белл, Alexander Graham Bell, 1876 г.) и фонограф (Т. Эдисон, Thomas Alva Edison, 1877 г.). В дальнейшем акустика начала приобретать все более прикладной характер. Сегодня достижения акустики внедрены практически во все сферы человеческой деятельности — радиовещание, связь, метеорологию, гидрологию, сейсмологию, военно-промышленный комплекс, биологию и медицину [2].

Акустика из предмета исследований давно превратилась в средство решения научных и технических задач. Прикладная акустика базируется на следующих технических элементах: это приемоизлучающие средства (микрофоны, динамики, датчики), преобразователи сигнала (усилители, фильтры, модуляторы/демодуляторы), средства передачи (волноводы, кабели, радиоканалы), регистрирующие средства (самописцы, магнитофоны, цифровые регистраторы), средства анализа и обработки сигналов (процессоры и аппаратно-программные комплексы). Методы акустических измерений разделяют на пассивные (только регистрация) и активные (излучение и последующая регистрация отраженного сигнала). Пассивные методы применяются при изучении процессов, являющихся самостоятельными источниками акустических сигналов. При проведении активных акустических измерений создают акустическую «подсветку» с последующим выявлением скрытой структуры среды, недоступной для исследования оптическими средствами. Пассивная и активная акустика получила широкое применение в решении военных задач — гидролокация кораблей и подводных лодок, определение координат артиллерийских позиций противника, измерение боевых параметров новых боеприпасов и множество других задач. Эти же акустические методы служат и в мирных целях — в геологии и сейсмологии активно применяются системы сейсмопрофилирования, на тех же принципах основаны системы неразрушающего контроля и дефектоскопии в промышленности. В биологии с помощью акустических средств изучаются особенности поведения летучих мышей и морских животных [3].

Историческое развитие медицинской акустики шло по пути от простого выслушивания звуков, возникающих в процессе жизнедеятельности организма человека, в сторону разработки сложных систем, работающих в частотном диапазоне инфразвука, слышимого звука и ультразву-

ка с активным сканированием исследуемой области. Долгое время врачи в своей практике использовали слышимый звук в виде двух методик — перкуссии и аускультации [4]. При проведении перкуссии оценивается звуковой ответ на простукивание тела пациента, при аускультации — слышимый звук работы органов и систем человеческого организма. Обе эти диагностические методики используют два разнонаправленных принципа акустики — активное и пассивное измерение слышимого звука по определенным субъективным критериям. Перкуссия является аналогом активной локации и помогает врачу устанавливать индивидуальную топографию внутреннего органа или распространение патологического процесса. При аускультации по выслушиваемым звукам оценивают функциональное состояние исследуемого органа.

На протяжении долгого периода времени аускультация и перкуссия дополняли друг друга. С появлением рентгена началось постепенное вытеснение перкуссии как метода топического исследования. Широкое внедрение ультразвукового исследования, мультиспиральной компьютерной томографии и магнитно-резонансной томографии привело к тому, что перкуссия окончательно перешла в разряд скрининговых методов исследования. Напротив, с появлением цифровых технологий аускультация как метод, оценивающий функцию органа по генерируемому им звуку, продолжила свое развитие. На смену обычному стетоскопу, который изобретен в 1816 г. Рене Лаэннеком (фр. René-Théophile-Hyacinthe Laënnec), пришли электронные средства аускультации, позволяющие регистрировать звуковые колебания работы органов с поверхности тела человека в широком диапазоне частот и интенсивности [5]. Компьютер-ассистированная аускультация позволяет записывать звуковые колебания в цифровом виде, обрабатывать полученные данные и получать объективные результаты. Так, аускультацию сердца сменила фонокардиография, аускультацию легких — фонопневмография, бронхофонография и трахеофонография [6]. Медицинские технологии позволяют проводить суточное акустическое мониторирование легочного дыхания и сердечной деятельности [7].

Достижения акустики на сегодняшний день применяются практически во всех областях медицины. Физиологическая акустика изучает физику и биофизику органов слуха и речи, а также последствия действия упругих колебаний на организм человека в целом. Исследуются и находят свое практическое применение упругие колебания в диагностике и лечении терапевтических и хирургических заболеваний человека. Созданы устройства для протезирования голосового аппарата и коррекции слуха, которые позволяют социально адаптировать данный контингент больных [8].

Активные акустические методы применяются для определения механических свойств тканей человеческого организма, при этом используют общий физический принцип измерения задержки распространения поверхностной волны (механического возбуждения) через фазовый сдвиг между сигналом возбуждения и сигналом отклика. При помощи этого метода в дерматологии определяют стадию развития псориаза и экземы, в офтальмологии оценивают биохимические свойства роговицы и склеры, в хирургии определяют типы гемангиом и рубцовых перерождений кожи, в пластической хирургии используют метод предоперационного обследования перед маммопластикой [8].

В современной оториноларингологии широко применяются как активные, так и пассивные акустические методы исследования уха, горла и носа.

Активные акустические методы исследования уха, горла и носа

Аудиометрия и слуховые вызванные потенциалы — исследование слуха пациента и разборчивости речи, оценка восприятия звуковых колебаний различной силы и частоты [9].

Акустическая импедансометрия — измерение акустического импеданса в наружном слуховом проходе при изменяемом барометрическом давлении. Включает также акустическую рефлексометрию, определение физического объема и тесты функции слуховой трубы [10].

Ультразвуковые тесты функции внутреннего уха — определение порогов чувствительности и латерализации ультразвука [11].

Сонотубометрия — анализ изменения интенсивности звукового сигнала, подаваемого через полость носа, в наружном слуховом проходе во время глотка. Этот метод разработан для оценки функции слуховой трубы, однако не нашел широкого клинического применения [12].

Акустическая ринометрия — определение площади поперечного сечения в различных отделах полости носа на основании отражения звукового сигнала, направляемого в полость носа [13].

Ультразвуковое исследование околоносовых пазух, небных миндалин, гортани — определение структурных изменений за счет оценки отражения ультразвуковых волн [14].

Отоакустическая эмиссия (ОЭ) — исследование звуков, которые генерируются в улитке внутреннего уха. Этот метод, исследующий внутреннее ухо человека, условно можно отнести к активным акустическим методам исследования, так как изучение спонтанной ОЭ, возникающей без внешних стимулов, не нашло применения в клинической практике, поскольку является непостоянным феноменом. Вызванная ОЭ появляется при подаче в наружный слуховой проход звуковых тонов; с помощью микрофона определяют амплитуду полученных звуковых колебаний [15].

Пассивные акустические методы исследования уха, горла и носа

Компьютерный акустический анализ голоса (КААГ) — акустический метод, объективно оценивающий фонатурную функцию гортани. Данный метод позволяет объективно оценить диапазон голоса, частоту его основного тона, количество обертонов, формантный состав звукового сигнала и характеристики вибрато. КААГ используют для исследования функции голоса в норме и при заболеваниях гортани, для дифференциальной диагностики дисфонии и определения типа голоса вокалистов [16].

Исследование проводят в звукоизолированном помещении. Звук голоса записывают с помощью микрофона при фонации одного звука (обычно в течение 5 с) или речи (чтение текста в течение 2—3 мин). Для изучения вокального профиля обследуемый воспроизводит заданные на фортепиано ноты в комфортном для него диапазоне. Сигнал с микрофона поступает на персональный компьютер; звуковой сигнал обрабатывает специальное программное обеспечение. Результаты анализа голоса представлены в виде графика и различных числовых акустических показателей [17] **(рис. 1)**.

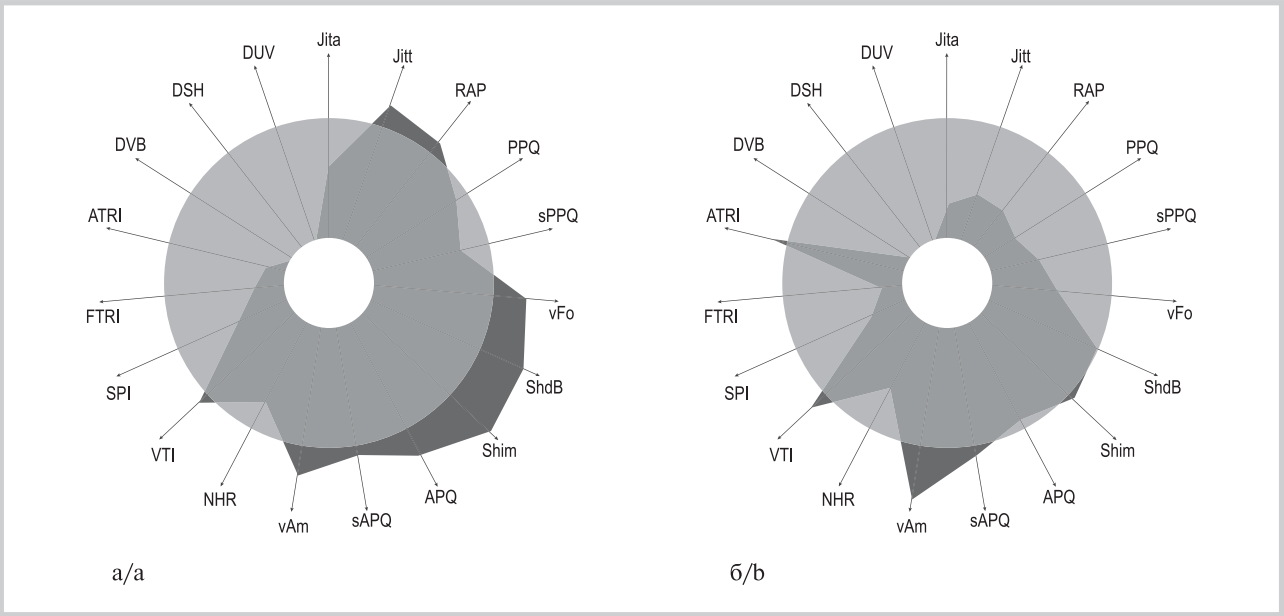


Рис. 1. **Результаты компьютерного анализа голоса у пациента с функциональной дисфонией.**
а — до лечения; б — после лечения.

Fig. 1. **Results of computer analysis of the voice in a patient with functional dysphonia before (1a) and after (1b) treatment.**

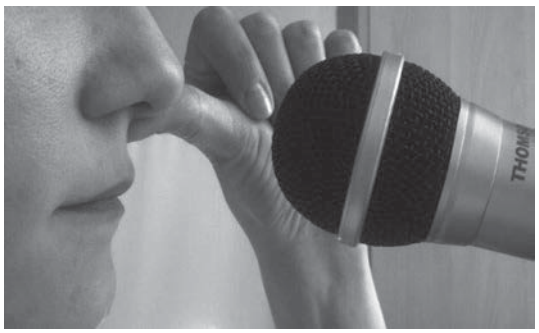


Рис. 2. **Методика проведения спектрального акустического анализа носового дыхания.**

Fig. 2. **Technique for spectral acoustic analysis of nasal breathing.**

КААГ, в частности, позволяет рассчитать такие показатели, как сила голоса, выраженная в дБ, и частота основного тона, выраженная в Гц. Сила голоса определяется амплитудой колебания голосовых складок, которая зависит от подскладочного давления (сила вдоха) и составляет при речи от 40 до 70 дБ. Программа также оценивает стабильность амплитуды звуковой волны во времени — коэффициенты Shimmer, APQ, vAM. Увеличение значений этих показателей свидетельствует о невозможности голосовых складок поддерживать периодические колебания определенной амплитуды и наличии турбулентного шума. Частота основного тона зависит от длины, толщины и напряжения голосовых складок, определяет тембр голоса и колеблется в диапазоне от 60 до 1360 Гц. Как и для амплитуды, для частоты основного тона программа рассчитывает показатели стабильности в краткосрочном (Jitter, RAP, PPQ) и долгосрочном (vFo) периодах. Высокие значения данных показателей свидетельствуют о невозможности голосовых складок поддерживать колебания с определенной периодичностью. Другим немаловажным рассчитываемым показателем является время максимальной фонации, т.е. время, в течение которого обследуемый может фонировать звук. Этот показатель характеризует качество фонационного дыхания и плотность смыкания голосовых складок. Отдельно в процессе анализа рассчитывается наличие шумовых компонентов в спектре и фонационных пауз. Высокие значения шумовых индексов (NHR, VTI, SPI) могут свидетельствовать о нестабильности голоса и неполном смыкании голосовых складок. Увеличение показателей фонационных пауз (DVB, DUV, DSH) соответствует появлению диплофонии (раздвоение звука) [17]. В комплексе данные показатели дают безальтернативную возможность объективно оценить качество певческого голоса, диагностировать и документировать изменение голосовой функции при органической и функциональной патологии гортани [18].

Акустический анализ носового дыхания (ААНД) — акустический метод, объективно оценивающий дыхательную функцию наружного носового клапана (НК).

Патология НК считается одной из наиболее частых причин назальной обструкции и ключевым фактором в развитии функциональных нарушений носа. Различают статический и динамический коллапс НК, проявляющиеся нарушением носового дыхания. Статический коллапс НК проявляется избыточным сужением полости носа за счет гипертрофии нижних носовых раковин, искривления перегородки носа, патологических изменений хрящей крыла носа, рубцовых процессов. Динамический коллапс НК обусловлен западением крыльев носа за счет уменьшения давления в полости носа [19]. Для функциональной оценки НК применялись проба Cottle, проба с ваткой и проба с расширением НК, которые являются субъективными и низкоспецифичными методами оценки носового дыхания. Компьютерная речевая лаборатория, предназначен-

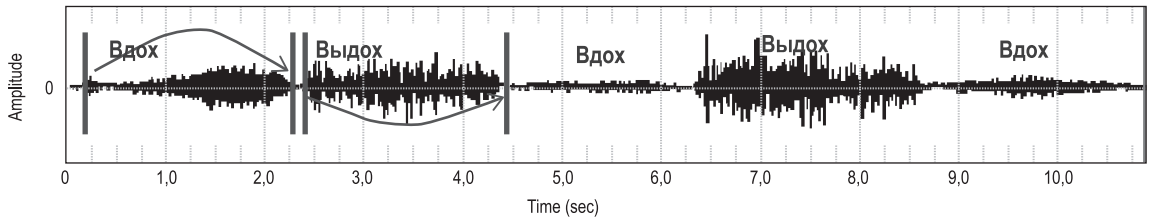


Рис. 3. **Акустический анализ при исследовании носового дыхания.**
Fig. 3. **Acoustic analysis of nasal breathing output.**

Показатель акустического анализа носового дыхания в норме и при недостаточности наружного носового клапана
Indicator of acoustic analysis of nasal breathing in normal conditions and in case of insufficiency of the external nasal valve

Показатель	Спокойное дыхание	Проба Cottle	Форсированное дыхание
Норма, с	2,05	2,19	1,17
Недостаточность НК (рубцовая деформация преддверия носа), с	1,37	1,39	0,41

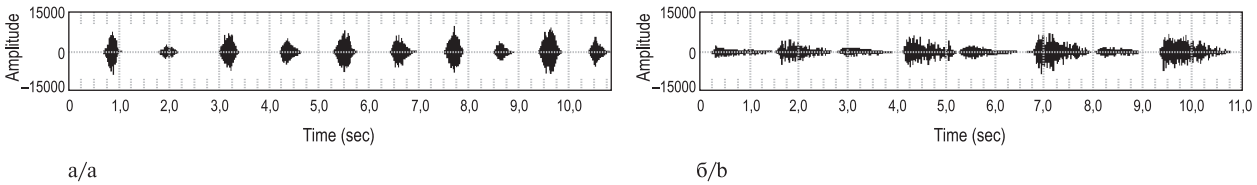


Рис. 4. **Акустический анализ носового дыхания пациента с недостаточностью носового клапана.**
а — до лечения; б — после z-образной пластики преддверия носа.

Fig. 4. **Acoustic analysis of nasal breathing in a patient with nasal valve insufficiency.**
a — before treatment; b — after z-shaped plasty of the vestibule of the nose.

ная для медицинского анализа речи, характеризуется высокой степенью акустической чувствительности и позволяет регистрировать минимальные звуковые колебания, в том числе возникающие при дыхании через нос [20]. Функциональной характеристикой НК является показатель продолжительности вдоха. ААНД позволяет регистрировать звук носового дыхания с четкой фиксацией продолжительности фаз вдоха и выдоха.

Методика ААНД разработана А.И. Крюковым и соавт. в ГБУЗ «НИКИО им. Л.И. Свержевского» ДЗМ [21]. Исследование проводят отдельно для левой и правой половин носа (одна из ноздрей закрыта). Микрофон, регистрирующий звук носового дыхания, устанавливают на уровне кончика носа на расстоянии 3 см, что позволяет исключить звук удара воздушной струи **(рис. 2)**.

Пациент дышит через нос в трех режимах: спокойное дыхание, спокойное дыхание с пробой Cottle и форсированное дыхание. Каждое исследование начинают с фазы вдоха и продолжают в течение 11 с, что позволяет зарегистрировать 3—4 дыхательных цикла. Полученный результат ААНД отображается графически в системе координат: амплитуда звуковой волны в дБ и продолжительность в секундах (с) **(рис. 3)**.

Оценку функционального состояния НК проводят только по продолжительности фазы вдоха (с), так как установлено, что амплитуда звука и продолжительность выдоха неинформативны при данной патологии. Методика ААНД доказала свою эффективность при диагностике посттравматической рубцовой деформации преддверия носа, проявляющейся статическим коллапсом НК. Установлены объективные параметры нормы и функциональной недостаточности НК [22] **(см. таблицу)**.

ААНД позволяет также оценить эффективность проведенного хирургического лечения недостаточности НК. На **рис. 4** представлен пример восстановления дыхательной функции НК на 376,9% после проведенной операции в преддверии носа.

А.И. Крюков и соавт. при помощи компьютерной речевой лаборатории впервые изучили акустические показатели носового дыхания. На основе полученных данных проанализированы параметры носового дыхания в норме и определены диагностически значимые показатели носового дыхания у пациентов с патологией НК [22].

Пассивную акустику применили в изучении *звуков, возникающих в результате работы слуховой трубы.* Происхождение этих звуков связывали с различными возможными механизмами: движение барабанной перепонки, сокращение мышц среднего уха, соударение стенок слуховой трубы при закрытии или разрыве жидкостного слоя, покрывающего слизистую оболочку слуховой трубы [23]. В своем экспериментальном исследовании на кадаверном материале и добровольцах H. Pau и соавт. [24] записывали

звуки в области наружного слухового прохода на частоте 500—2000 Гц. В кадаверном эксперименте авторы провоцировали пассивное открытие слуховой трубы путем постепенного увеличения давления в герметично обтурированном слуховом проходе (в барабанной перепонке предварительно создавали отверстие). У здоровых добровольцев провоцировали сокращения стременной мышцы и мышцы, натягивающей барабанную перепонку, а также вызывали движение барабанной перепонки. При выполнении этих маневров проводили запись звуков из наружного слухового прохода. Авторы показали, что «разрыв» слоя слизи при открытии слуховой трубы является наиболее вероятным источником звуков при открытии. Звуки имели среднюю продолжительность 29 мс и соотношение сигнал/шум в среднем 16 дБ [24].

Та же группа авторов проводили исследование на 80 здоровых добровольцах и пациентах с целью определения репрезентативности звуковых сигналов для оценки открытия слуховой трубы [23]. Они проводили запись звуков с наружного слухового прохода с синхронной записью давления в наружном слуховом проходе. Для этого ими модифицировано устройство манометра для наружного слухового прохода за счет размещения в нем высокочувствительного микрофона. Газ под давлением подавали в носоглотку во время глотания. При этом при открытии слуховой трубы происходило изменение давления в наружном слуховом проходе. Показатели давления и звуковой сигнал записывали непрерывно, и их графики располагали для сопоставления на одной временной оси. Звуковой сигнал дополнительно обрабатывали для уменьшения шума. Авторы обнаружили, что сигналы у добровольцев при активном открытии слуховой трубы имели длительность в среднем 47 мс, соотношение сигнал/шум — 20,5 дБ. Появление звуков совпадало с изменением давления в наружном слуховом проходе в 98% случаев. Звуки фиксировали у 91% добровольцев при выполнении тестов на открытие слуховой трубы. Звуковые сигналы, похожие на открытие слуховой трубы, очень редко фиксировались случайно на графиках (2% «щелчков»). В перспективе предполагается возможность регистрации и последующей оценки звуковых сигналов функционирования слуховой трубы в течение длительного времени.

Таким образом, можно констатировать постепенное внедрение пассивных акустических методов исследования в изучение функционального состояния уха, горла и носа. Мы считаем, что в оториноларингологии это направление является перспективным, и требуется его научное и практическое развитие. Первоначальной задачей является разработка способов регистрации звуковых колебаний, связанных с работой уха, горла и носа. Нос и околоносовые пазухи, структуры глотки и среднего уха в результате выполнения своих функций генерируют звуки и вибрации. Но в процессе эволюции эти органы оптимизированы с точки зрения минимизации энергозатрат, что привело к чрезвычайно малой интенсивности генерируемых звуковых колебаний. Первоначальной задачей является выделение «полезных» и имеющих значение для анализа сигналов на фоне сопряженных звуков и шумов. Это можно решить, применив высокочувствительные минимикрофоны направленного типа, усилители и аппаратные фильтры, выделяющие необходимый диапазон частот, а также вспомогательные средства и материалы, обеспечивающие акустический барьер от внешних шумов.

Наряду с применением современных первичных преобразователей и элементов аналоговой обработки сигналов базисом развития средств акустических исследований в оториноларингологии может служить внедрение новых методов и алгоритмов обработки данных, реализуемых в измерительных приборах и программно-аппаратных комплексах. С учетом современных тенденций развития средств обработки данных определенные перспективы имеют алгоритмы анализа и диагностики с применением элементов искусственного интеллекта. Особенно востребованы и эффективны данные методы при поступлении значительного объема обрабатываемой информации. Важным условием при этом является предварительное «обучение» алгоритмов на контрольном материале, которое заключается в формировании акустических паттернов, соответствующих нормальной работе и патологическим состояниям уха, горла и носа. Данный процесс наиболее трудозатратен, и требуется совместное участие оториноларингологов и специалистов-акустиков.

Заключение

Подводя итог, можно отметить, с одной стороны, широкое внедрение акустических методов исследования в медицину вообще и в оториноларингологию в частности. С другой стороны, продолжающийся прогресс компьютерного анализа данных и совершенствование технического аппарата открывают новые научные перспективы использования акустических технологий для обследования пациентов с заболеваниями уха, горла и носа.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflicts of interest.

ЛИТЕРАТУРА/REFERENCES

1. Прохоров А.М. *Физический энциклопедический словарь.* М.: Советская энциклопедия; 1983.
Prokhorov AM. *Fizicheskii entsiklopedicheskii slovar'.* M.: Sovetskaya entsiklopediya; 1983. (In Russ.).
2. Лопатухина И.Е., Кутеева Г.А., Павилайнен Г.В., Поляхова Е.Н., Рудакова Т.В., Сабанеев В.С., Тихонов А.А. *Очерки по истории механики и физики. Учебное пособие для студентов и аспирантов, обучающихся по направлениям: астрономия, математика, механика, прикладная математика, физика.* СПб.: ВВМ; 2016.
Lopatukhina IE, Kuteeva GA, Pavilainen GV, Polyakhova EN, Rudakova TV, Sabaneev VS, Tikhonov AA. *Ocherki po istorii mekhaniki i fiziki. Uchebnoe posobie dlya studentov i aspirantov, obuchayushchikhsya po napravleniyam: astronomiya, matematika, mekhanika, prikladnaya matematika, fizika.* SPb.: VVM; 2016. (In Russ.).
3. Вахитов Ш.Я., Ковалгин Ю.А., Фадеев А.А., Щевьев Ю.П. *Акустика.* Учебник для вузов. М.: Горячая линия — Телеком; 2018.
Vakhitov ShYa, Kovalgin YuA, Fadeev AA, Shchev'ev YuP. *Akustika.* Uchebnik dlya vuzov. M.: Goryachaya liniya — Telekom; 2018. (In Russ.).

4. Адзерихо И.Э., Лутик И.Л., Казакова М.И. Аускультация в практике врача: возможности и перспективы метода. *Медицинские новости*. 2014;6:38-42.
Adzerikho IE, Lutik IL, Kazakova MI. Auscultation in the practice of a medical doctor: possibilities and prospects of the method. *Meditsinskie novosti*. 2014;6:38-42. (In Russ.).

5. Мирошниченко Ю.В., Халимов Ю.Ш., Умаров С.З. Развитие технических средств аускультации. *Военно-медицинский журнал*. 2019:340(4):54-59.
Miroshnichenko YuV, Khalimov YuSh, Umarov SZ. Development of technical means of auscultation. *Voenno-meditsinskii zhurnal*. 2019:340(4):54-59. (In Russ.).

6. Малышев В.С., Мельникова И.М., Мизерницкий Ю.Л., Доровская Н.Л., Павленко В.А., Павликов А.А., Удальцова Е.В. Опыт использования компьютерной бронхофонографии в педиатрической практике. *Медицинский совет*. 2019;2:188-193.
Malyshev VS, Mel'nikova IM, Mizernitskii YuL, Dorovskaya NL, Pavlenko VA, Pavlikov AA, Udal'tsova EV. Experience of using computer bronchophonography in pediatric practice. *Meditsinskii sovet*. 2019;2:188-193. (In Russ.).
https://doi.org/10.21518/2079-701X-2019-2-188-193

7. Чурилов Л.П., Строев Ю.И. Аускультация при сердечно-сосудистых заболеваниях. *Российские биомедицинские исследования*. 2018;3(3):3-13.
Churilov LP, Stroev YuI. Auscultation in cardiovascular diseases. *Rossiiskie biomeditsinskie issledovaniya*. 2018;3(3):3-13. (In Russ.).

8. Федорова В.Н., Фаустова Е.Е., Козырь Л.В., Быстрова Е.С. Обзор применения акустических методов в медицине (за последние 25 лет). *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. 2015;11(2):228-231.
Fedorova VN, Faustova EE, Kozyr' LV, Bystrova ES. Review of the application of acoustic methods in medicine (for the last 25 years). *Mezhdunarodnyi zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovanii*. 2015;11(2):228-231. (In Russ.).

9. Almeyda R, Nash R. Assessing and treating adult patients with hearing loss. *British Journal of Hospital Medicine*. 2018;79(11):628-633.
https://doi.org/10.12968/hmed.2018.79.11.628

10. Пальчун В.Т., Левина Ю.В., Гусева А.Л., Ефимова С.П., Доронина О.М. Акустическая импедансометрия: эволюция диагностических возможностей. *Вестник оториноларингологии*. 2015;80(6):59-64.
Pal'chun VT, Levina YuV, Guseva AL, Efimova SP, Doronina OM. Acoustic impedancometry: the evolution of diagnostic possibilities. *Vestnik otorinolaringologii*. 2015;80(6):59-64. (In Russ.).
https://doi.org/10.17116/otorino201580659-64

11. Кунельская Н.Л., Гаров Е.В., Загорская Е.Е., Шеремет А.С., Байбакова Е.В., Кудеева Я.Ю. Ультразвук в диагностике заболеваний внутреннего уха. *Вестник оториноларингологии*. 2015;80(2):12-15.
Kunel'skaya NL, Garov EV, Zagorskaya EE, Sheremet AS, Baibakova EV, Kudeeva YaYu. The application of ultrasound for diagnostics of middle ear pathologies. *Vestnik otorinolaringologii*. 2015;80(2):12-15. (In Russ.).
https://doi.org/10.17116/otorino201580212-15

12. Beleskiene V, Lesinskas E, Januskiene V, Daunoraviciene K, Rauba D, Ivaska J. Eustachian Tube Opening Measurement by Sonotubometry Using Perfect Sequences for Healthy Adults. *Clinical and Experimental Otorhinolaryngology*. 2016;9(2):116-122.
https://doi.org/10.21053/ceo.2015.00626

13. Spataro E, Most SP. Measuring Nasal Obstruction Outcomes. *Otolaryngologic Clinics of North America*. 2018;51(5):883-895.
https://doi.org/10.1016/j.otc.2018.05.013

14. Гафурова А.И. Возможности УЗ-диагностики органов головы и шеи. *Российская оториноларингология*. 2018;6(97):91-97.
Gafurova AI. Possibilities of ultrasound diagnostics of the head and neck organs. *Rossiiskaya otorinolaringologiya*. 2018;6(97):91-97. (In Russ.).
https://doi.org/10.18692/1810-4800-2018-6-91-97

15. Гарбарук Е.С., Горкина О.К., Павлов П.В. Отоакустическая эмиссия: фундаментальные предпосылки и клиническое применение (обзор литературы). *Медицина: теория и практика*. 2019;4(3):70-77.
Garbaruk ES, Gorkina OK, Pavlov PV. Otoacoustic emissions: fundamental principles and clinical application (literature review). *Meditsina: teoriya i praktika*. 2019;4(3):70-77. (In Russ.).

16. Кунельская Н.Л., Романенко С.Г., Павлихин О.Г., Лесогорова Е.В., Яковлев В.С., Лучшева Ю.В. Этиопатогенетическое лечение узелков голосовых складок у профессиональных вокалистов. *Вестник оториноларингологии*. 2019;84(2):13-17.
Kunel'skaya NL, Romanenko SG, Pavlikhin OG, Lesogorova EV, Yakovlev VS, Luchsheva YuV. Etiopathogenetic treatment of professional singers with vocal nodules. *Vestnik otorinolaringologii*. 2019;84(2):13-17. (In Russ.).
https://doi.org/10.17116/otorino20198402113

17. Романенко С.Г., Павлихин О.Г., Лесогорова Е.В., Краснikова Д.И., Елисеев О.В. Метод компьютерного акустического анализа голоса в диагностике нарушения голосовой функции у пациентов старшей возрастной группы. *Вестник оториноларингологии*. 2013;5:204-205.
Romanenko SG, Pavlikhin OG, Lesogorova EV, Krasnikova DI, Eliseev OV. The method of computer acoustic analysis of the voice in the diagnosis of impaired voice function in patients of the older age group. *Vestnik otorinolaringologii*. 2013;5:204-205. (In Russ.).

18. Turkmen HI, Karsligil ME. Advanced computing solutions for analysis of laryngeal disorders. *Medical and Biological Engineering and Computing*. 2019;57(11):2535-2552.
https://doi.org/10.1007/s11517-019-02031-9

19. Hsu DW, Suh JD. Anatomy and Physiology of Nasal Obstruction. *Otolaryngologic Clinics of North America*. 2018;51(5):853-865.
https://doi.org/10.1016/j.otc.2018.05.001

20. Кунельская Н.Л., Царапкин Г.Ю., Ивойлов А.Ю., Товмасян А.С., Горовая Е.В., Усачева Н.В. Функциональная диагностика патологии наружного носового клапана. *Лечебное дело*. 2017;1:66-69.
Kunel'skaya NL, Tsarapkin GYu, Ivoilov AYu, Tovmasyan AS, Gorovaya EV, Usacheva NV. Functional diagnosis of external nasal valve dysfunction. *Lechebnoe delo*. 2017;1:66-69. (In Russ.).

21. Крюков А.И., Царапкин Г.Ю., Чумаков П.Л., Товмасян А.С., Горовая Е.В., Усачева Н.В., Федоткина К.М. *Способ выявления патологии носового клапана*. Патент РФ на изобретение №2579631 от 10.03.16.
Kryukov AI, Tsarapkin GYu, Chumakov PL, Tovmasyan AS, Gorovaya EV, Usacheva NV, Fedotkina KM. *Sposob vyyavleniya patologii nosovogo klapana*. Patent RF na izobretenie №2579631 ot 10.03.16. (In Russ.).

22. Крюков А.И., Царапкин Г.Ю., Товмасян А.С., Усачева Н.В. Оптимизация диагностики патологии носового клапана. *Российская оториноларингология*. 2017;3(88):61-65.
Kryukov AI, Tsarapkin GYu, Tovmasyan AS, Usacheva NV. Optimization of the nasal valve pathology diagnostics. *Rossiiskaya otorinolaringologiya*. 2017;3(88):61-65. (In Russ.).
https://doi.org/10.18692/1810-4800-2017-3-61-65

23. Ehrt K, Fischer HG, Dahl R, Punke C, Ovari A, Pau HW. «Physiological» ear clicking — its origin and potential usability as a test tool for the Eustachian tube function. *Otology and Neurotology*. 2016;37(4):345-349.
https://doi.org/10.1097/MAO.0000000000000973

24. Pau HW, Ehrt K, Fischer HG, Ovari A, Mlynski R. On the origin of ear clicks during deglutition or pressure equalization. *European Archives of Oto-Rhino-Laryngology*. 2016;273(12):4267-4271.
https://doi.org/10.1007/s00405-016-4178-z

Поступила 18.08.2020
Received 18.08.2020
Принята к печати 12.10.2020
Accepted 12.10.2020