

## АКУСТИКО-СПЕКТРАЛЬНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ГОЛОСА У ДЕТЕЙ ПОСЛЕ ОПЕРАЦИЙ НА ГОРТАНИ

Алиева М.У., Иноятова Ф.И., Абдукаюмов А.А., Наджимутдинова Н.Ш.,  
Мансурова С.А.

Республиканский специализированный научно-практический медицинский центр  
педиатрии, г. Ташкент

### XULOSA

**Tadqiqot maqsadi.** Hiqildoq jarrohlik amaliyotidan keyingi bolalarda ovoz funksiyasi buzilishlarini kompyuterli spektral ovoz tahlilini qo'llash orqali tashxislashni takomillashtirishdan iborat.

**Materiallar va usullar.** Turli xil hiqildoq patologiyasi bo'yicha jarrohlik davolanishidan o'tgan, 3 yoshdan 17 yoshgacha bo'lgan 118 nafar bola (70 nafar o'g'il bola – 59,3%, 48 nafar qiz bola – 40,7%) tekshirildi. Ovoz funksiyasi N. Yanagihara shkalasi bo'yicha disfoniya darajasini aniqlash, maksimal fonatsiya vaqti, asosiy ton chastotasi, kompyuterli spektral va akustik ovoz tahlili hamda pVHI hayot sifati so'rovnomasi yordamida baholandi. Statistik tahlil o'rtacha qiymatlar ( $M \pm m$ ) va standart chetlanishni ( $\sigma$ ) hisoblash orqali o'tkazildi; farqlar  $p < 0,05$  ahamiyatlilik darajasida ishonchli deb hisoblandi.

**Natijalar.** Disfoniya darajasi va ovoz funksiyasi ko'rsatkichlari (asosiy ton chastotasi, maksimal fonatsiya vaqti) hiqildoq patologiyasi turiga qarab statistik jihatdan ishonchli farq qildi va jarrohlik davolanishidan keyin ishonchli yaxshilandi ( $p < 0,05$ ). Kompyuterli spektral ovoz tahlili tekshirilgan bolalarda ovoz funksiyasi buzilishlarining xarakteri va darajasini obyektivlashtirish imkonini berdi.

**Xulosa.** Kompyuterli spektral ovoz tahlili hiqildoq operatsiyalaridan keyingi bolalarda ovoz funksiyasi buzilishlarini tashxislashning obyektiv va yuqori informativ usuli bo'lib, klinik amaliyotda keng qo'llanilishi tavsiya etiladi.

**Kalit so'zlar:** ovoz, disfoniya, bolalar, hiqildoq, jarrohlik davolash, spektral tahlil, ovozning akustik tahlili, asosiy ton chastotasi.

Голос является уникальным инструментом межличностного общения. В процессе развития ребенка и формирования его как личности голос играет важную роль, способствуя выражению эмоций, чувств и настроения, и, подобно отпечаткам пальцев, голос обеспечивает вокальную индивидуальность и уникальность человека [1,8]. В связи с этим качество голоса приобретает большое значение для социальной адаптации ребенка в окружающей среде.

К основным акустическим параметрам голоса относят его интенсивность, частоту основного тона и тембровую окраску. Воспринимаемая сила голоса определяется уровнем звукового давления и зависит

### SUMMARY

**Objective.** To improve the diagnosis of voice function disorders in children after laryngeal surgery by using computer spectral voice analysis.

**Materials and methods.** The study included 118 children aged 3 to 17 years (70 boys – 59.3%, 48 girls – 40.7%) who had undergone surgical treatment for various laryngeal pathologies. Voice function was assessed using the N. Yanagihara dysphonia grading scale, maximum phonation time, fundamental frequency, computer spectral and acoustic voice analysis, and the pVHI quality-of-life questionnaire. Statistical analysis included calculation of mean values ( $M \pm m$ ) and standard deviation ( $\sigma$ ); differences were considered statistically significant at  $p < 0.05$ .

**Results.** The degree of dysphonia and voice function parameters (fundamental frequency, maximum phonation time) differed significantly depending on the type of laryngeal pathology and improved significantly after surgical treatment ( $p < 0.05$ ). Computer spectral voice analysis allowed objective assessment of the nature and severity of voice function disorders in the children examined.

**Conclusion.** Computer spectral voice analysis is an objective and highly informative method for diagnosing voice function disorders in children after laryngeal surgery and can be recommended for wide clinical use.

**Keywords:** voice, dysphonia, children, larynx, surgical treatment, spectral analysis, acoustic voice analysis, fundamental frequency.

от давления воздуха в подскладочном пространстве, степени натяжения голосовых складок и амплитуды их колебаний. Данный показатель выражается в децибелах (дБ). Высота голоса связана с частотой периодических колебаний воздушной среды, возникающих в результате последовательного смыкания и размыкания голосовых складок, и измеряется в герцах (Гц).

Тембр представляет собой индивидуальную акустическую окраску голоса и отражает особенности спектрального состава звукового сигнала. Его формирование определяется соотношением частотных и амплитудных характеристик отдельных компо-

нентов звука [2,7]. Речевые звуки имеют сложную структуру и включают основной тон, определяющий воспринимаемую высоту голоса, а также ряд дополнительных высокочастотных составляющих – обертонов. Их появление связано с тем, что в процессе фонации голосовые складки совершают колебания не только как единое целое, но и отдельными участками. Совокупность основного тона и частичных колебаний формирует спектральный рисунок голоса и во многом определяет особенности его тембра. Среди наиболее значимых характеристик голосовой функции выделяют тембр, высоту, темп и интенсивность, которые могут изменяться относительно независимо друг от друга [3].

Современные компьютерные методы акустического анализа существенно расширили возможности объективной оценки голосовой функции. С их помощью можно определять диапазон голоса, частоту основного тона, структуру обертонов, формантные характеристики и параметры вибрата. Одним из наиболее информативных способов инструментальной оценки голоса, в том числе в детском возрасте, считается компьютерный спектральный анализ, позволяющий получить количественные показатели акустических свойств голосового сигнала [4,6].

#### ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Совершенствование диагностики нарушений голосовой функции у детей после операций на гортани путем применения компьютерного спектрального анализа голоса.

#### МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Клинический материал составили 118 пациентов в возрасте от 3 до 17 лет, находившихся на обследовании и лечении в Республиканском специализированном научно-практическом медицинском центре педиатрии, из них 70 (59,3%) мальчиков и 48 (40,7%) девочек.

По возрасту больные были распределены в соответствии с общепринятой схемой периодизации биологического возраста детей и взрослых, принятой в медицине и закрепленной ВОЗ (выпуск №3, 2017 г.). Средний возраст обследованных больных составил  $8,67 \pm 1,45$  года ( $\min=6$ ,  $\max=11$ ,  $\sigma=2,52$ ). Результаты гендерного и возрастного распределения показали, что наибольшее количество составили дети в возрасте от 4 до 11 лет, при этом больные 4-6 лет составили 58,5%, а меньше всего было детей в возрасте 12-17 лет – 15,2%.

Методика обследования гортани у детей после операций спектральным компьютерным анализом голоса заключалась в том, что после сбора анамнеза заболевания, проведения общеклинического обследования, ларингоскопии, микроларингоскопии обследование проводилось в специальном кабинете, оборудованном звукоизоляцией, с использованием микрофона (например, типа SM91A фирмы Shure Inc., США); запись звучания голоса осуществлялась на компьютере, снабженном неспециализированной

звуковой платой AWE 32 фирмы Creative Labs [5].

Для проведения компьютерного спектрального исследования голосового сигнала может использоваться программа Sound Forge с 16-битной записью и частотой дискретизации 44,1 кГц, что обеспечивает регистрацию частот в диапазоне приблизительно до 22 кГц. Обработка полученного материала выполняется с применением быстрого преобразования Фурье и различных режимов усреднения спектральных характеристик.

Перед исследованием пациенту предлагают выполнить кратковременную голосовую нагрузку в течение около 5 минут, например чтение текста, что способствует функциональной подготовке голосового аппарата. После этого обследуемый последовательно воспроизводит звуки в пределах предполагаемого рабочего диапазона – от низких к более высоким. Фонация проводится как с высокой, так и с низкой интенсивностью (*forte* и *piano*), с интервалом в терцию, при этом эталонная высота каждой ноты задается с помощью синтезатора.

Полученные данные отображаются графически и позволяют в реальном времени оценить особенности голосового диапазона, характер нарастания и ослабления звукового сигнала, тип начала фонации, а также стабильность воспроизведения гласных звуков. При построении спектрограммы по горизонтальной оси отражается продолжительность фонации в секундах, а по вертикальной – амплитуда преобразованного сигнала, выраженная в милливольтках. Использование спектрального компьютерного анализа расширяет возможности диагностики нарушений голосовой функции, которые не всегда выявляются при стандартном обследовании. В частности, метод позволяет обнаруживать признаки фонастении, нарушения регистрового режима голосообразования и другие функциональные отклонения, способные в дальнейшем способствовать формированию как функциональной, так и органической дисфонии. Особое значение спектральный анализ имеет при необходимости уточнения типа голоса у лиц, профессиональная деятельность которых связана с повышенной голосовой нагрузкой и требует высокого качества фонации. К таким категориям относятся педагоги, переводчики, дикторы и вокалисты [6].

Оценка голосовой функции осуществлялась на основании:

- определения степени дисфонии (по шкале N. Yanagihara);
- времени максимальной фонации (ВМФ);
- частоты основного тона (по данным стробоскопии);
- оценки голоса по данным компьютерного спектрального анализа голоса (САГ);
- оценки голоса по акустическому анализу голоса (ААГ);
- инструментов самооценки – определения качества жизни (pVHI).

Статистическая обработка полученных данных проведена методами вариационной статистики с вычислением  $M \pm m$  и  $\sigma$ ; достоверность различий оценивалась по критерию Стьюдента при  $p < 0,05$ .

#### РЕЗУЛЬТАТЫ

Изучение анамнеза показало, что все больные перенесли оперативные вмешательства, при этом количество операций в группах было различным, в связи с чем нами был проведен анализ их кратности. Так, количество перенесенных операций у больных с дисфониями составило: в группе больных с рубцовыми деформациями гортани – в среднем  $2,7 \pm 1,4$  операции, дети с РПП перенесли больше всего операций –  $4,2 \pm 1,05$ , в группе больных с врожденной патологией мембран и ларингоцеле – 1,6 операции, а в группе больных с ограниченными образованиями голосовых складок все больные перенесли по одной операции. При этом вид операции при рубцовых деформациях был наружным доступом с трахеостомой и дли-

тельным канюленосительством, в среднем в течение 3 лет; при приобретенных образованиях, таких как РПП, узелки голосовых складок, псевдокисты и образования, ограничивающиеся голосовыми складками, все больные перенесли эндоскопические операции. При врожденных патологиях гортани – мембранах гортани и ларингоцеле – из 5 больных с мембранами гортани у 4 операции были выполнены наружным (экстраларингеальным) доступом, у одного – эндоларингеально; у 6 больных с ларингоцеле все операции выполнялись эндоскопически, однако в 2 случаях – с наложением трахеостомы.

Дисфония, определяемая по шкале N. Yanagihara, показана в таблице 1. По степени дисфонии нами выявлено, что 1-я степень определялась у 4 больных, что составило 3,4%, 2-я степень выявлена у 65 больных (55,1%), 3-я степень – у 39 больных (33,1%), 4-я степень – у 10 больных (8,5%).

Таблица 1

Показатели изменения голоса у больных детей (шкала N. Yanagihara)

| Степень дисфонии               | РПП, n=58 | УГС/новообразования голосовых складок, n=28 | Рубцовые деформации гортани приобретенные, n=21 | Врожденная патология, n=11 | Всего, n/% |
|--------------------------------|-----------|---------------------------------------------|-------------------------------------------------|----------------------------|------------|
| 0 – нормальный голос           | 0         | 0                                           | 0                                               | 0                          | 0          |
| 1 – глухой голос               | 4         | 0                                           | 0                                               | 0                          | 4/3,4      |
| 2 – легкая степень охриплости  | 29        | 20                                          | 11                                              | 5                          | 65/55,1    |
| 3 – средняя степень охриплости | 21        | 8                                           | 7                                               | 3                          | 39/33,1    |
| 4 – тяжелая степень охриплости | 4         | 0                                           | 3                                               | 3                          | 10/8,5     |
| 5 – афония                     | 0         | 0                                           | 0                                               | 0                          | 0          |

Эндоскопическое исследование гортани у всех больных не выявило сужения просвета гортани и дыхательной трубки.

При этом эндоскопические изменения по группам исследования показали следующее. В группе после операций по поводу рубцовых деформаций гортани у всех больных отмечены рубцовые изменения слизистой голосовых складок: ограниченного характера – 47,6% (n=10), рубцовые мембраны по передней комиссуре, занимающие менее 30% просвета, – 23,8% (n=5), полная рубцовая деформация голосового и вестибулярного отделов без сужения просвета – 28,6% (n=6). В группе после операций по поводу врожденной патологии (мембраны, ларингоцеле) – ограниченного характера – 18,2% (n=2), рубцовые мембраны по передней комиссуре, занимающие менее 30% просвета, – 27,2% (n=3), полная рубцовая деформация голосового и/или вестибулярного отделов без сужения просвета – 54,5% (n=6).

В группе после операций по поводу РПП у всех больных отмечены рубцовые изменения слизистой голосовых складок: ограниченного характера – 46,6% (n=27), рубцовые мембраны по передней комиссуре, занимающие менее 30% просвета, – 20,7% (n=12), полная рубцовая деформация голосового и/или вестибулярного отделов без сужения просвета – 32,8% (n=19). В группе после операций по поводу УГС/но-

вообразований голосовых складок отмечены рубцовые изменения слизистой ограниченного характера – 71,4% (n=20), без видимых изменений – 28,6% (n=8).

Акустические/аэродинамические измерения основывались на определении частоты основного тона (ЧОТ) и времени максимальной фонации (ВМФ) (табл. 2). ЧОТ и ВМФ определялись у всех детей старше 5 лет. При этом нами проанализированы показатели как при первичном поступлении, так и после операции на гортани.

Анализ акустических показателей выявил грубые изменения голосовой функции у всех больных: показатель ЧОТ до операции был значительно ниже нормативных значений и составил  $20,68 \pm 4,25$  Гц, после операции он увеличился до  $83,60 \pm 3,80$  Гц ( $p < 0,05$ ).

При этом до операции минимальный показатель ЧОТ сводился к нулевому значению, после операции – увеличивался до 23 Гц.

Исследование данных по группам показало следующее. Анализ акустических показателей выявил грубые изменения голосовой функции у больных с врожденной патологией гортани и рубцовыми деформациями гортани: показатель ЧОТ до операции не определялся (0) в обеих группах, после операции голос появился с показателями ЧОТ  $55,5 \pm 3,23$  Гц в группе с врожденной патологией гортани и  $51,82 \pm 1,86$  Гц в группе с рубцовыми деформациями

гортани. Показатели ВМФ свидетельствуют о значительном ее укорочении до операции –  $2,83 \pm 0,27$  сек и  $3,39 \pm 0,13$  сек в группах с врожденной патологией гортани и рубцовыми деформациями гортани соот-

ветственно. После операции отмечено удлинение ВМФ до  $6,11 \pm 0,68$  сек и  $6,43 \pm 0,17$  сек в соответствующих группах – почти в 2 раза, однако без достижения нормативных показателей.

Таблица 2

Характеристика ЧОТ и ВМФ у больных с дисфониями

| Показатели | До операции, ЧОТ, Гц | До операции, ВМФ, сек | После операции, ЧОТ, Гц | После операции, ВМФ, сек |
|------------|----------------------|-----------------------|-------------------------|--------------------------|
| M±m        | 20,68±4,25           | 5,25±0,28             | 83,60±3,80**            | 9,26±0,31*               |
| Min        | 0                    | 2,00                  | 23                      | 4,00                     |
| Max        | 170                  | 16,00                 | 210                     | 16,00                    |
| σ          | 46,13                | 3,04                  | 41,29                   | 3,24                     |

Примечание: \*  $p < 0,05$  – статистически значимое различие показателя ВМФ до и после операции; \*\*  $p < 0,05$  – статистически значимое различие показателя ЧОТ до и после операции.

Анализ групп с патологией, ограниченной голосовыми складками (РРП и УГС), показал более благоприятные параметры. Показатель ЧОТ до операции составил  $31,28 \pm 6,10$  Гц в группе РРП и  $50,36 \pm 5,75$  Гц в группе УГС; после операции –  $99,33 \pm 4,71$  Гц и  $110,4 \pm 5,6$  Гц соответственно. Показатели ВМФ до операции составили  $3,36 \pm 0,36$  сек в группе РРП и  $7,25 \pm 0,28$  сек в группе УГС; после операции отмечено удлинение до  $10,46 \pm 0,34$  сек и  $13,26 \pm 0,21$  сек соответственно – почти в 3 раза, не достигая нормативных показателей в группе РРП и почти достигая их в группе УГС. По данным литературы, свидетельством наличия у детей патологического процесса на голосовых складках, занимающего большую площадь, является укорочение ВМФ до 5 секунд у детей 5-7 лет, что отражает снижение плотности смыкания голосовых складок [6].

Спектральный компьютерный анализ голоса позволил определить особенности спектральных характеристик (график) для каждого вида изменений (голосовые узелки, травма голосовых складок – одной или двух, объемное образование, иные патологические изменения и их характер). Анализ показателей спектрограмм, в частности их акустических характеристик, показал, что показатель энтропии как при дисфонии 2-й степени, так и при дисфонии 3-4-й степени не имел выраженных колебаний, однако его составляющие minSV и maxSV отличались от контрольных значений: в группе с более грубыми нарушениями (дисфония 3-4-й степени) – в 3,2–1,7 раза, в группе с дисфонией 2-й степени – в 3,8–2,02 раза. Показатель зего (число нулевых точек) был пропорционален вероятности наличия шумов при произнесении звуков, обусловленных волнообразными движениями голосовых складок, – чем более синхронны эти движения, тем ниже показатель нулевых точек. Так, при дисфункции движений голосовых складок, обусловленной нарушением колебаний волокон, показатель зего был в 3,9 раза выше показателя контрольной группы. У больных с рубцовыми изменениями показатель зего был выше лишь на 1,6 раза.

Это свидетельствует о том, что показатель нулевых точек отражает степень синхронности колеба-

тельных движений голосовых складок: асинхронные колебания при нарушении формирования волны создают большую зашумленность сигнала с увеличением данного показателя. Информативными также являются показатели минимальных и максимальных значений и, особенно, показатель энергии, затрачиваемой на голосообразование, – чем выше энергозатраты, тем выраженнее патология.

Показатель энергии после операций по поводу УГС был меньше, чем после РРП, рубцовых деформаций и врожденной патологии (более чем в 1,5 раза), но в то же время превышал нормативные показатели в 1,2 раза, что свидетельствует о наибольших энергозатратах голосообразования после врожденной патологии и рубцовых деформаций гортани и наименьших – после операций по поводу УГС.

Показатель зего также различался по группам исследования: он был выше в группе после врожденных аномалий и в группе после УГС (более высокая асинхронность движения голосовых складок), тогда как в группах после РРП и рубцовых деформаций этот показатель был ниже, что связано с отсутствием выраженной турбулентности вследствие рубцовых изменений, ограничивающих подвижность слизистой голосовых складок.

Полученные данные позволяют в режиме реального времени проводить быструю диагностику нарушений голоса у детей с определением вида патологии, а также оценивать эффективность коррекции голоса. Спектральное исследование голосового сигнала целесообразно применять в комплексе с общепринятыми методами обследования пациентов с заболеваниями голосового аппарата. Такой подход позволяет более точно оценить выраженность нарушений голосовой функции при различных патологических состояниях, уточнить функциональные изменения и обосновать выбор лечебной тактики.

Акустический анализ голоса у пациентов с дисфонией относится к объективным методам оценки функционального состояния голосового аппарата и может использоваться как дополнительный диагностический инструмент при заболеваниях гортани [9]. Компьютерный спектральный анализ обеспечи-

вает визуализацию зарегистрированного голосового диапазона в режиме реального времени и позволяет оценивать характер усиления и затухания звукового сигнала, стабильность фонации гласных, а также динамику голосовой функции. У детей данный метод может быть полезен для контроля состояния голосового аппарата и оценки функциональных результатов после оперативных вмешательств на гортани.

#### ВЫВОДЫ

- При заболеваниях гортани спектральные характеристики голоса в процессе произнесения гласных фонем претерпевают выраженные изменения по сравнению с физиологическими показателями.

- Компьютерный анализ спектра голосового сигнала позволяет выявлять различия между отдельными вариантами фонации и объективизировать особенности голосообразования.

- Характерные спектральные изменения при различных формах патологии гортани могут быть систематизированы и использованы для формирования диагностических критериев голосовых нарушений.

- Дальнейшее совершенствование методов спектрального анализа создаёт возможности для разработки автоматизированных компьютерных систем, предназначенных для диагностики заболеваний гортани и нарушений голосовой функции.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Аникеева З.И. Современные методы диагностики и комплексного лечения заболеваний респираторного тракта у профессионалов голоса в амбулаторных условиях. М.: Граница, 2011. 415 с.
2. Василенко Ю.С., Мещеркин А.П., Павлихин О.Г., Романенко С.Г. Спектральный компьютерный

анализ голоса – метод ранней и дифференциальной диагностики нарушений голосовой функции. URL: <https://nikio.ru>

3. Вашкевич М.И., Азаров И. С. Определение патологии голосового аппарата на основе анализа модуляционного спектра речи в критических полосах // Труды СПИИРАН, 19:2 (2020), 249-276.
4. Вашкевич М.И., Бурак А.А. и др. Анализ акустических параметров голоса для выявления заболеваний гортани // Информатика. 2020. Т. 17, № 1. С. 78-86. DOI: 10.37661/1816-0301-2020-17-1-78-86.
5. Корень Е.Е., Степанова Ю.Е., Мохотаева М.В., Бахилин В.М. Результаты акустического исследования голоса больных с функциональными и органическими дисфониями. URL: <https://lornii.ru/press-centr/publikatsii/rezultaty-akusticheskogo-issledovaniya-golosa-bolnykh-s-funktsionalnymi-i-organicheskimi-disfoniymi/>.
6. Коротченко В.В. Акустический анализ голоса у детей в норме и при заболеваниях гортани: автореф. дис. ... канд. мед. наук. М., 2012.
7. Голос как инструмент: биоакустические и психофизиологические основы формирования уникального тембра / Панина Р.Р. // Международный научный журнал «ВЕСТНИК НАУКИ». – 2025. – № 7 (88) Том 1. – С.204-213.
8. Рамишвили Г.С. Речевой сигнал и индивидуальность голоса. Тбилиси: Мецниереба, 1976. 183 с.
9. Davis S., Mermelstein P. Comparison of parametric representations for monosyllabic word recognition in continuously spoken sentences // IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing. 1980. Vol. 28, No. 4. P. 357-366.