

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ ВИБРАЦИОННОЙ АКТИВНОСТИ ГОЛОСОВЫХ СВЯЗОК

Беловолова Л.В.¹, Беловолов М.И.¹, Парамонов В.М.¹ Беловолов М.М.¹
Свиштушкин М.В.², Луничева А.А.²

¹ Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Научный центр волоконной оптики РАН им. Е.М. Дианова
ул. Вавилова, 38, г. Москва, 119991, РФ; e-mail: est123321@mail.ru

² Первый МГМУ им. И.М. Сеченова Минздрава России
ул. Большая Пироговская, 2, стр. 4, г. Москва, 119435, РФ
Поступила в редакцию 21.07.2022. DOI: 10.29039/rusjbpс.2022.0521

Аннотация. С целью разработки аппаратуры для диагностики состояния голосовых связок (ГС) человека и контроля их активности в процессе лечения выполнен комплекс исследований образцов ГС животных (кроликов). Создана высокочувствительная бесконтактная лазерно-оптическая аппаратура и методика регистрации вибраций ГС в потоке воздуха с регулируемым напором. Для группы кроликов одного возраста приводятся данные по регистрации вибрационных частот у здоровых ГС и полученных в результате лечебных воздействий («леченые» ГС). Обнаружено, что при пропуске через трахею воздуха под небольшим давлением $\sim 10 - 20$ мм рт. ст. проявляются три пика характерных частот собственных механических вибраций ГС в диапазоне $\sim 200 - 1000$ Гц. Как правило, это основная частота f_1 и две ее гармоники $f_2 = 2 f_1$ и $f_3 = 3 f_1$. Лучше всего эти колебания возбуждаются на исходе вытекания воздуха под давлением $1 - 5$ мм рт. ст. Обнаружено различие возбуждаемых вибраций на низких частотах у здоровых ГС и ГС, имеющих дефекты в виде рубца на одной связке. Частоты низших собственных вибраций у дефектной ГС несколько выше по сравнению с низшей частотой у здоровой ГС, что объясняется ростом ее жесткости при образовании рубцовой ткани. Методика отличается простотой регистрации, чувствительностью и информативностью при проведении лечения методами регенеративной медицины. Диагностика состояния ГС в процессе лечения в сравнении с данными для здоровой ГС представляется информативной и полезной для восстановления вибрационных свойств голосовых связок в процессе лечения.

Ключевые слова: голосовые связки, собственные частоты вибраций, волоконно-оптический зонд, лазерный интерферометр, амплитудно-частотная характеристика.

ВВЕДЕНИЕ

Голосовые связки (ГС) – небольшого размера мышечные складки (рис. 1), которые крепятся к внутренней стороне гортани. В норме они достаточно гибкие и могут регулировать расстояние между своими краями в очень широких пределах. При дыхании они разведены в стороны, чтобы не препятствовать потоку выдыхаемого воздуха. При голосовом звучании они смыкаются и вибрируют в зависимости от их напряжения и напора выдыхаемого воздуха. Частота колебаний ГС, от которой зависит высота тона, определяется упругостью голосовых связок, их длиной и массой. Поверхность складок покрыта плотной эластичной тканью и слизью, внутри них находятся внешние и внутренние щиточерпаловидные мышцы. Внутренние мышцы называют вокальными мышцами. Мышечные волокна в вокальных мышцах располагаются параллельно внутреннему краю складки и в косом направлении. Благодаря такому строению голосовая складка может менять не только свою длину и толщину, но и колебаться по частям: во всю ширину, длину и частями, а производимый ими звук может содержать набор частот.

Существует большое число нарушений функционирования ГС, обусловленных простудными и воспалительными явлениями, вирусно-инфекционными и онкологическими заболеваниями. Поэтому, создание бесконтактной высокочувствительной аппаратуры для измерений объективных параметров, которые бы

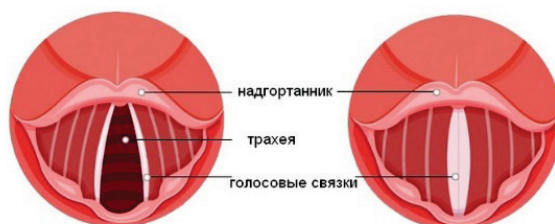


Рисунок 1. Схема строения голосовых связок (ГС). Слева — связки раскрыты, воздух проходит свободно, голос не создаётся. Справа — сомкнутые ГС при создании голоса

однозначно характеризовали состояние ГС в норме и патологиях, является актуальной задачей. Этой теме посвящен ряд работ (см. [1-4]) по исследованию вибрационных характеристик ГС. Общими недостатками существующих методов и подходов в настоящее время является низкая чувствительность приборов и неприменимость методик к слабым вибрациям ГС, что приводит к необходимости использования сильных возбуждений ГС, которые не всегда возможны при болезни и могут вызывать искажения общей картины вибраций. Задачей настоящей работы была разработка высокочувствительного лазерного комплекса для диагностики колебаний ГС в слабых воздушных потоках, наиболее подходящих для диагностики и лечения ГС в щадящих по голосовым нагрузкам условиях.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Исследования вибрационной активности ГС были проведены на специально созданной экспериментальной установке (рис. 2). Она представляет собой высокочувствительный виброметр с лазерным волоконно-оптическим зондом 3 на конце одномодового волокна с керамическим наконечником и плоским торцом. Чувствительным элементом установки является низкодобротный интерферометр Фабри-Перо, образуемый плоским торцом волоконного наконечника с 4% Френелевским отражением и первой границей вибрирующей поверхности ГС, покрытой слизью (показатель преломления около 1,5 и коэффициент отражения $\sim 1-4\%$). Наконечник волоконного зонда подводится к вибрирующей поверхности ГС (правой на рис. 2) на расстояние $\sim 0,5-1$ мм и отраженное излучение эффективно собирается этим же одномодовым волокном в наконечнике и поступает в фотоприемник оптоэлектронного блока для детектирования и преобразования в выходной электрический сигнал вибро-акустического отклика, который подается на правый R канал аналого-цифрового преобразователя (АЦП). На левый канал одновременно может подаваться сигнал с малогабаритного электрического конденсаторного микрофона 4 для контроля слабого уровня звуковой нагрузки для ГС или в качестве индикатора, если звук зондом не регистрируется.

Оптоэлектронный блок 5 установки содержит малошумящий стабилизированный одночастотный полупроводниковый лазер непрерывного режима работы с внешним резонатором на волоконной Брэгговской решетке типа BDL-1550-14DL-20 (фирма НОЛАТЕХ, Россия) мощностью 1 мВт на длине волны 1,55 мкм и шириной спектральной линии генерации $\Delta\nu \leq 0,1$ МГц. Это излучение не видимо для глаз и безопасно для человека. Лазер питается стабилизированным током инжекции и корпус лазера стабилизирован по температуре с точностью $\sim 0,001$ °С. Длина когерентности излучения лазера составляет сотни метров и степень когерентности излучения для длин резонатора $\sim 1-2$ мм с высокой точностью равняется единице ($\gamma=1$). Диапазон регистрируемых блоком 5 частот вибраций составляет ~ 20 Гц - 20 кГц. В качестве детектора обратно отраженного сигнала с наконечника волоконно-оптического зонда использовали малошумящий фотоприемник типа PDA30B2 с регулируемым усилением и рабочим диапазоном длин волн 800–1800 нм и полосой частот до 590 кГц.

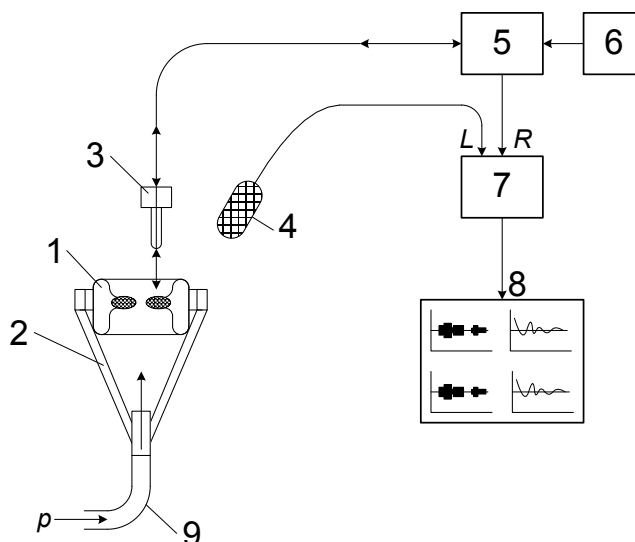


Рисунок 2. Схема экспериментальной установки для исследования вибрационной активности ГС лазерным волоконно-оптическим зондом и записи звучания производимого ими звука в персональный компьютер (8). Образец трахеи 1 животного с ГС установлен в силиконовом конусе - фиксаторе 2. Применены следующие обозначения основных составляющих установки: 3 – керамический наконечник с одномодовым волокном – оптический зонд, 4 – электрический микрофон, 5 – оптоэлектронный блок со стабилизированным одночастотным лазером на 1,55 мкм, мощностью 1 мВт и фотоприемником, 6 – вспомогательный полупроводниковый лазер на красной длине волны 0,63 мкм, 7 – двухканальный АЦП, 8 – персональный компьютер со специальным программным обеспечением и быстрым преобразованием Фурье звуковых сигналов, Р – вход для продува воздуха или ввода стимулирующего малые вибрации звукового сигнала силой 60–80 дБ

В составе блока 5 в качестве оптического мультиплексора, выполняющего роль устройства ввода/вывода излучения из волоконно-оптического зонда 3, применен направленный разветвитель 1:3 на одномодовых оптических волокнах типа SMF28. Для визуализации места зондирования на третий волоконный вход мультиплексора одновременно с основным измерительным излучением одночастотного лазера на 1,55 мкм может подаваться излучение от вспомогательного полупроводникового лазера 6 на длине волны 0,63 мкм.

Механические вибрации ГС регистрировали с помощью волоконно-оптического зонда независимо от измерения звука, который мог быть слабым и не слышимым человеческим ухом по уровню звукового давления $\leq 2 \cdot 10^{-5}$ Па. Положение точки оптического зондирования образца варьировали с помощью трехкоординатного столика x, y, z для механических перемещений образца ГС относительно волоконно-оптического зонда.

Для записи результатов и обработки данных мы использовали специальное программное обеспечение типа Спектра Плюс, которое было предназначено для обработки звуковых и вибрационных сигналов и адаптировано для решения задач нашей работы.

Техническими особенностями разработанной нами установки являются использование одночастотного полупроводникового лазера со стабилизацией режима питания током и температуры, а также малошумящего высокочувствительного фотоприемника. Особенность методики работы состояла в сопоставлении частот и формы спектральных линий вибрационных сигналов от здоровых и леченых ГС.

Волоконно-интерферометрический метод регистрации вибраций с помощью одночастотного лазерного излучения обладает высокой чувствительностью, безынерционностью, стерильностью и адекватно отображает спектр колебаний исследуемого объекта, если регистрация отклика производится в режиме слабого сигнала воздействия с линейной модуляционной характеристикой преобразователя вибраций в аналогичный по форме выходной электрический сигнал. Физические основы работы лазерного интерферометрического виброметра были изложены, например, в работе [5].

Основы методики измерений и обработки сигналов. В основе методики диагностических измерений вибрационных свойств ГС лежит предположение, что при малых давлениях протекающего через гортань стимулирующего вибрации воздуха сомкнутые ГС слегка расходятся и начинают совершать колебательные движения, которые можно представить колебаниями натянутой струны с закрепленными концами. При слабых воздействиях колебания каждой ГС происходят независимо друг от друга с малой амплитудой - меньше четверти длины волны ($\lambda/4$) зондирующего лазерного излучения. При этом предположительно возбуждаются собственные частоты, характерные для мод колеблющейся струны. Наиболее интенсивными по амплитуде можно ожидать основную частоту f_1 и ее гармоники, кратные основной частоте $f_2 = 2f_1$ и $f_3 = 3f_1$. Основная частота f_1 колебаний голосовой связки соответствует условию, когда на длине струны укладывается половина длины волны механического колебания ГС. На середине струны – ГС можно ожидать колебание наибольшей амплитуды (пучность). При достаточной добротности колебаний здоровой ГС возможны вибрации с частотами более высокого порядка, чем 3-я. Такая ситуация характерна для упругой здоровой ГС.

Таким образом, основным индикатором работы диагностической аппаратуры является регистрация основной низшей частоты f_1 вибраций ГС и одной или большего числа кратных гармоник у здоровой ГС. У ГС, подвергнутой лечению, можно ожидать изменение частоты основной гармоники колебаний f_1 , уменьшение числа кратных гармоник и само нарушение кратности гармоник, а также их исчезновение, если в результате лечения ГС потеряла однородность, содержит рубцы и узлы более плотной ткани. Поскольку ГС являются парным органом у животных и человека, то характеристические частоты вибраций здоровой ГС служат образцом для оценки эффективности лечения и степени восстановления вибрационных свойств ГС при лечении.

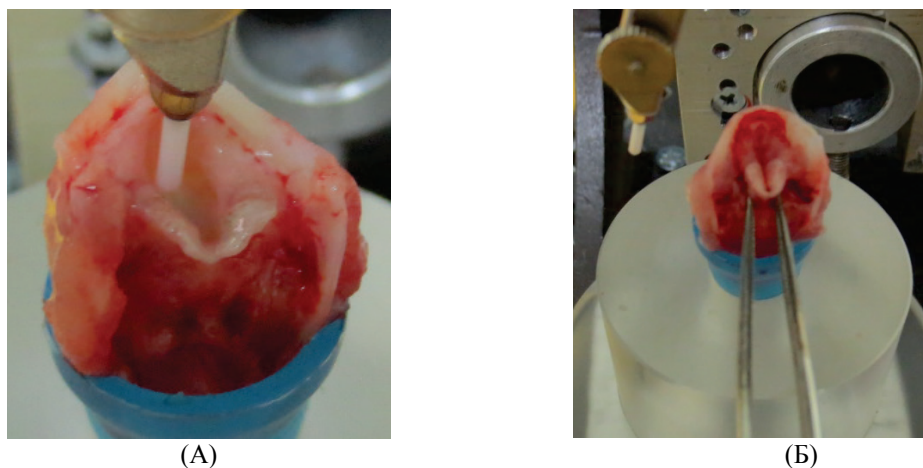


Рисунок 3. Фото образца гортани ГС на рабочем месте в силиконовом конусе. А – зонд на левой ГС (леченой), Б – ГС сомкнуты

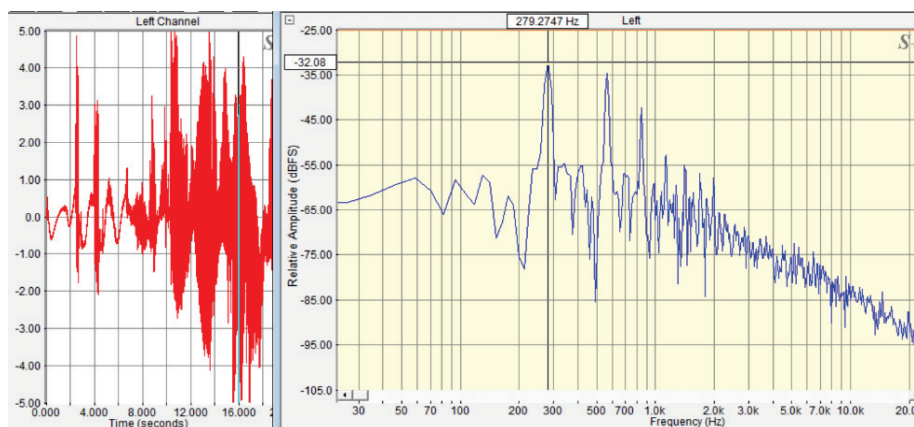


Рисунок 4. Запись амплитуды вибраций от времени у здоровой ГС кролика №1 (слева) и спектр быстрого преобразования Фурье (справа) в выбранной точке времени, помеченном вертикальной линией – маркером. Основная частота характеристических вибраций и ее гармоники составляют $f_1 = 279$ Гц, $f_2 = 554$ Гц, $f_3 = 843$ Гц

Таким образом при записи выходного сигнала в реальном времени и параллельной обработке с помощью быстрого преобразования Фурье, предоставляется возможность наблюдать как амплитуды сигналов на отдельных частотах вибрационного отклика, так и их огибающую - амплитудно-частотную характеристику (АЧХ). Предполагаем, что по сдвигу частот и нарушению их регулярности (кратности) можно судить о степени дефектности голосовой связки и эффективности лечения.

На рисунке 3 показаны гортани кролика на рабочем месте установки с разомкнутыми (А) и сомкнутыми ГС (Б). Воздух поступает через гортань снизу, а волоконный зонд считывает вибрации сверху. Торцы волоконного наконечника подводят к поверхности выбранной ГС на расстояние ~ 1 мм. При этом обеспечивалась достаточная светосила установки, чтобы регистрировать вибрационные отклики в динамическом диапазоне не менее 60 дБ над уровнем шумового фона системы регистрации.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ И ОБСУЖДЕНИЕ

В данной работе сравнивали сигналы частот вибраций здоровых ГС и ГС, подвергнутых лечению разной степени воздействия, включая хирургическое.

На рис. 4 представлены записи амплитуды вибраций правой здоровой ГС у кролика №1 от времени (слева) и мгновенная АЧХ - спектр Фурье (справа) в выделенный маркером момент времени (вертикальная линия на рис. 4 слева), зарегистрированные волоконно-оптическим зондом.

Из рисунка 4 видно, что для здоровой ГС основная гармоника на частоте $f_1 = 279$ Гц вибрирует активно и наблюдаются последующие вторая и третья гармоники вибраций $f_2 = 554$ Гц, $f_3 = 843$ Гц, соответственно.

Следует отметить, что в данном эксперименте для здоровых ГС наблюдается кратность частот гармоник с погрешностью измерений частот не больше ~ 20 Гц. Наличие четких гармоник вибраций качественно свидетельствует в пользу модели ГС в виде струны с закрепленными концами.

На рисунке 5 приведены записи амплитуд вибраций левой леченой ГС у кролика №1 и спектр быстрого преобразования Фурье в отмеченной точке записи. Обнаружено, что основная частота характеристических вибраций и ее гармоники проявляются активно: $f_1 = 321$ Гц, $f_2 = 644$ Гц, $f_3 = 980$ Гц. Заметны также частоты

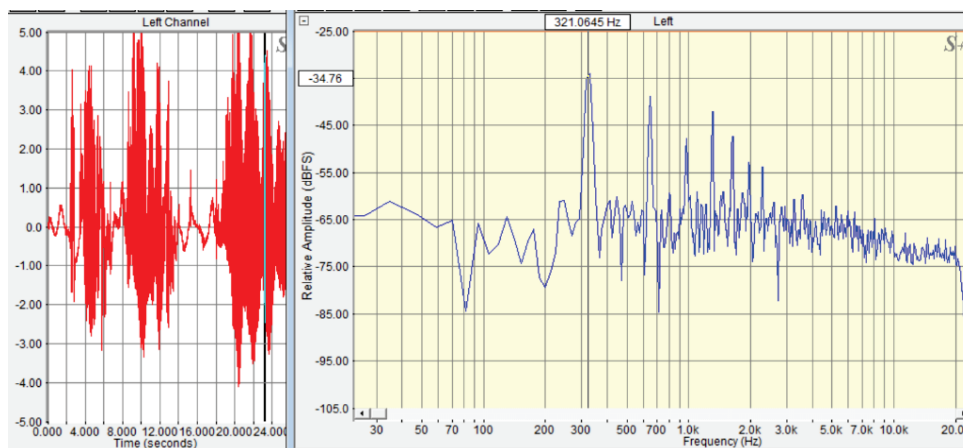


Рисунок 5. Запись амплитуд вибраций левой леченой ГС у кролика №1 (слева) и спектр быстрого преобразования Фурье (справа) в отмеченной точке записи. Основная частота характеристических вибраций и ее гармоники составляют $f_1 = 321$ Гц, $f_2 = 644$ Гц, $f_3 = 980$ Гц

Таблица 1. Результаты измерений основных частот вибраций f_1 и их гармоник у здоровых и леченых ГС кроликов

Кролик №	ГС правая здоровая Основная частота и гармоники, f_1, f_2, f_3 , Гц			ГС левая леченая Основная частота и гармоники, f_1, f_2, f_3 , Гц		
	f_1	f_2	f_3	f_1	f_2	f_3
1	279,	554,	843	321,	664,	980
2	187,	358,	569	201,	400,	602
3	242,	490,	711	276,	559,	840
4	292,	602,	905	339	-	-
5	315,	636,	975	нет вибраций		

вибраций более высокого порядка. Из сравнения частот вибраций здоровой и леченой ГС видно, что основные частоты и первые две гармоники по частотам являются заметно увеличенными для леченых ГС.

Увеличение частоты вибраций первой основной частоты f_1 у леченых ГС обнаружено нами на образцах ГС у 10 исследованных кроликов примерно одинаковой возрастной группы и подтверждает первые положительные результаты, полученные ранее в работе [5]. Сводка результатов измерений частот вибраций ГС для некоторой группы кроликов приведена в таблице 1.

Из таблицы 1 можно видеть, что увеличение частот леченых ГС относительно здоровых может составлять десятки Герц (~10–40 Гц) или больше 10% от абсолютного значения частоты f_1 . После лечения основная частота вибраций, как правило, существует, в то время как частоты – гармоники более высокого порядка могут пропадать, как демонстрируют результаты измерений на рисунке 6.

На рисунке 6 показаны вибрации ГС кролика 4 после хирургического воздействия, в результате чего образовались хирургические рубцы, что привело к повышению жесткости ткани связок и уменьшению их эластичности (упругости).

Возможен и вариант, когда в ходе лечения пропадает и первая гармоника, как это видно из данных таблицы 1 для случая кролика № 5. Такое поведение спектра частот вибраций характерно при грубых хирургических рубцах на ГС и лечения, которое привело к повышению жесткости ткани связок и потере эластичности (упругости).

Следует отметить, что в некоторых случаях, после лечения спектр частот вибраций ГС восстанавливался практически полностью как по значениям основной частоты f_1 и ее гармоник (с точностью измерения абсолютных значений частот ~ 1-3 Гц), так и по их амплитудам.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе продемонстрирована эффективная работа высокочувствительной бесконтактной лазерно-оптической аппаратуры и методика регистрации вибраций ГС в потоке воздуха с регулируемым напором. Экспериментально показано, что при пропускании через трахею воздуха под давлением ~ 1–20 мм рт. ст., обнаруживаются пики резонансов характерных частот собственных механических вибраций ГС в диапазоне ~ 200–1000 Гц, как правило, основная низшая частота f_1 и две ее гармоники $f_2 = 2 f_1$ и $f_3 = 3 f_1$. Лучше всего эти колебания возбуждаются на исходе вытекания воздуха под давлением 1–5 мм рт. ст. Обнаружено различие возбуждаемых вибраций на низких частотах у здоровых ГС и ГС леченых или имеющих дефекты в виде рубца на одной связке. Частоты низших собственных вибраций у дефектных ГС несколько выше по сравнению с низшей частотой у здоровых ГС, что объясняется ростом их жесткости при образовании рубцовой ткани. Приводятся данные по регистрации вибрационных частот у здоровых и леченых ГС, полученные для группы

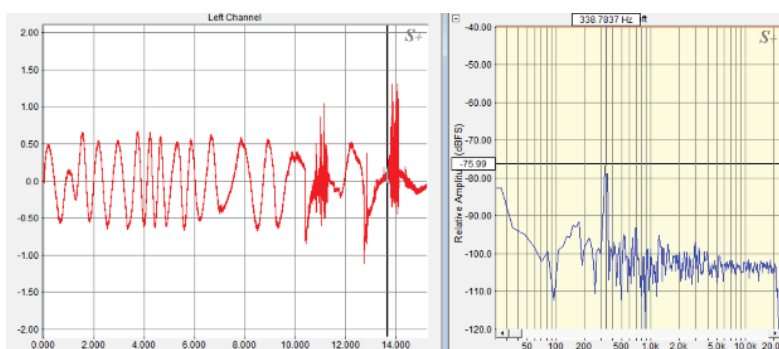


Рисунок 6. Вибрации левой леченой ГС Кролика №4. Наблюдается только основная частота $f_1 = 339$ Гц, увеличенная по сравнению с частотой здоровой ГС $f_1 = 292$ Гц вследствие рубца или огрубления ткани. Более высокие гармоники не наблюдаются

кроликов одного возраста Диагностика состояния леченой или дефектной ГС в паре с данными по частотам вибраций у здоровой ГС представляется информативной и полезной для восстановления вибрационных свойств голосовых связок в процессе лечения.

Оптический канал регистрации вибрационной активности голосовых связок с помощью волоконно-оптического зонда позволяет уверенно регистрировать собственные характеристические частоты вибрации ГС с малыми амплитудами колебаний, как правило, меньше ~ 1 мкм в щадящем режиме их возбуждения при пропуске воздуха, имитирующего выдох из легкого при небольшом давлении.

Методика диагностики состояния голосовых связок по регистрируемым резонансным частотам вибраций низшего порядка отличается простотой регистрации, чувствительностью и информативностью при проведении лечения методами регенеративной медицины. Мы полагаем существенную пользу от разработанной методики при клинической диагностике и лечении голосовых связок у животных с переносом методики на живых людей.

Список литературы / References:

1. Ammar H. Quantitative analysis of healthy and pathological vocal fold vibrations using an optical flow based waveform. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 2019, vol. 10, no. 4, pp. 388-393.
2. Titze I.R. Parameterization of the glottal area, glottal flow, and vocal fold contact area. *Journal Acoustical Society America*, 1984, vol. 75, no. 2, pp. 570-580.
3. Wittenberg T., Tigges M., Mergell P., Eysholdt U. Functional imaging of vocal fold vibration: digital multislice high-speed kymography. *Journal of Voice*, 2000, vol. 14, no. 3, pp. 422- 442.
4. Qiu Q., Schutte H., Gu L. and Yu Q. An automatic method to quantify the vibration properties of human vocal folds via videokymography. *Folia Phoniatrica et Logopeaetica*, 2003, vol. 55, no. 3, pp. 128-136.
5. Belovolov M.I., Paramonov V.M., Belovolov M.M., Svistushkin M.V., Svistushkin V.M., Arkhipov M.V., Mokonyane Z.T., Timofeeva V.A., Kotova S.L., Timashev P.S., Timashev S.F. Vibration activity of the vocal folds and a new instrumental technique for their study. *Optical Engineering*, 2020, vol. 59, no. 6, p. 061611.

METHODOLOGY FOR STUDYING THE VIBRATIONAL ACTIVITY OF THE VOCAL FOLDS

Belovolova L.V.¹, Belovolov M.I.¹, Paramonov V.M.¹, Belovolov M.M.¹, Svistushkin M.V.², Lunicheva A.A.²

¹ A.M. Prokhorov Institute of General Physics. RAS, E.M. Dianov Fiber Optics Research Center RAS

Vavilova str., 38, Moscow, 119991, Russia; e-mail: est123321@mail.ru

² I.M. Sechenov University

Bol'shaya Pirogovskaya Ulitsa, 2, build. 4, Moscow, 119435, Russia

Received 21.07.2022. DOI: 10.29039/rusjbp.2022.0521

Abstract. In order to develop equipment for diagnosing the state of the human vocal folds (VF) and monitoring their activity during treatment, a complex of studies of animal VF samples (rabbits) was performed. A highly sensitive non-contact laser-optical equipment and a technique for recording VF vibrations in an air flow with controlled pressure have been developed. For a group of rabbits of the same age, data are given on the registration of vibrational frequencies in healthy VFs and received as a result of therapeutic effects ("treated" VFs). It was found that when air is passed through the trachea under a slight pressure of 10-20 mm Hg. three peaks of the characteristic frequencies of natural mechanical vibrations of the VF appear in the range of $\sim 200 - 1000$ Hz. As a rule, this is the fundamental frequency f_1 and its two harmonics $f_2 = 2 f_1$ and $f_3 = 3 f_1$. Best of all, these oscillations are excited at the end of the outflow of air under a pressure of 1 - 5 mm Hg. A difference was found in the excited vibrations at low frequencies in healthy VF and VF with defects in the form of a scar on one ligament. The frequencies of the lowest natural vibrations in a defective VF are somewhat higher compared to the lowest frequency in a healthy VF, which is explained by an increase in its rigidity during the formation of scar tissue. The technique is characterized by ease of registration, sensitivity and informativeness during treatment by methods of regenerative medicine. Diagnosis of the state of the VF during treatment in comparison with the data for a healthy VF seems to be informative and useful for restoring the vibrational properties of the vocal cords during the treatment.

Key words: *vocal folds, natural vibration frequencies, fiber optic probe, laser interferometer, frequency response.*