

## ОТОАКУСТИЧЕСКАЯ ЭМИССИЯ НА ЧАСТОТЕ ПРОДУКТА ИСКАЖЕНИЯ ПРИ НАРУШЕНИИ ЗВУКОПРОВЕДЕНИЯ И ЗВУКОВОСПРИЯТИЯ. ДИАГНОСТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ЭФФЕКТА

Овчинников Е.Л.<sup>1</sup>, Яшин С.С.<sup>1</sup>, Адыширин-Заде К.А.<sup>1</sup>, Владимиров Т.Ю.<sup>1</sup>, Минаева Т.И.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Самарский государственный медицинский университет» Минздрава России, Самара, e-mail: E.L.Ovchinnikov@ya.ru

В настоящем исследовании оценивается возможность использования метода отоакустической эмиссии на частоте продукта искажения исходя из принципа изменений реактивных сопротивлений упругости и / или вязкости звукопроводящих сред среднего и внутреннего уха. В первой части работы теоретически обосновывается биофизическая модель реактивного сопротивления жёсткости и/или вязкости систем среднего и внутреннего уха. Вторая часть основана на представленной теоретической модели механоакустических преобразований и экспериментально подтверждает влияние изменений условий звукопроводения в системе среднего и / или внутреннего уха на регистрацию продукта искажения. Представленная работа позволяет понять природу продукта искажения, как сложную совокупную механоакустическую реакцию звукопроводящих систем среднего и внутреннего уха и активного ответа (мотильности) наружных волосковых клеток. Оценка природы продукта искажения отоакустической эмиссии и изменение параметров его регистрации даёт возможность выработать диагностические критерии патологии звукопроводения и звуковосприятия. Для этой цели разработана новая сравнительная классификация ДР-грамм. Представленная классификация хорошо отражает различные реальные клинические состояния. Она удобна в применении и может облегчить работу врача-оториноларинголога, сужая диапазон диагностического поиска.

Ключевые слова: отоакустическая эмиссия на частоте продукта искажения (ПИОАЭ), классификация ДР-грамм, упругое реактивное сопротивление, вязкое реактивное сопротивление.

## OTOACOUSTIC EMISSION DISTORTION PRODUCT IN VIOLATION SOUND CONDUCTION AND SOUND PERCEPTION. DIAGNOSIC SUBSTANTIATION OF THE EFFECT

Ovchinnikov E.L.<sup>1</sup>, Yashin S.S.<sup>1</sup>, Adyshirin-Zade K.A.<sup>1</sup>, Vladimirova T.Yu.<sup>1</sup>, Minaeva T.I.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Samara State Medical University, Samara, e-mail: E.L.Ovchinnikov@ya.ru

In this article, the possibility of using the method of otoacoustic emission at the frequency of the distortion product is estimated based on the principle of changes in the reactance of the elasticity and / or viscosity of the sound-conducting media of the middle and inner ear. In the first part of the work, a biophysical model of the reactivity of the stiffness and / or viscosity of the middle and inner ear systems is theoretically substantiated. The second part is based on the presented theoretical model of mechanoacoustic transformations and confirms experimentally the influence of changes in sound conditions in the middle and / or inner ear system on the registration of the distortion product. The presented work allows to understand the nature of the distortion product as a complex combined mechanoacoustic reaction of the sound-conducting systems of the middle and inner ear and the active response (motility) of the outer hair cells. Evaluation of the nature of the product distortion of otoacoustic emission and change in the parameters of its registration makes it possible to develop diagnostic criteria for the pathology of sound conduction and sound perception. For this purpose, a comparative classification of DP-grams has been developed. The presented classification reflects well the various real clinical conditions. It is convenient to use and can facilitate the work of a doctor-otorhinolaryngologist, narrowing the range of diagnostic search.

Keywords: Otoacoustic emission at the distortion product frequency (DPOAE), DP-gram classification, elastic reactance, viscous reactance.

С целью диагностики патологии внутреннего уха в клинической практике широко используется метод регистрации продукта искажения отоакустической эмиссии [1; 2].

Отоакустическая эмиссия представляет собой способ регистрации звуковых

колебаний, возникающих в улитке в ответ на акустическую стимуляцию [3]. Мы предполагаем, что получаемый ответ является суммарным результатом механоакустических преобразований в проводящей системе среднего уха и биомеханических процессов во внутреннем ухе.

Среднее ухо в норме, как колебательная система, обладающая упругостью, отвечает на звуковую стимуляцию изменением соответствующего реактивного сопротивления. Внутреннее ухо, имеющее в своей структуре элементы звукопроводения, такие как перилимфа, эндолимфа, кортиколимфа, реагирует на звуковые колебания изменением реактивного сопротивления вязкости [4]. При патологии ответ усложняется за счёт изменений условий звукопроводения или звуковосприятия с увеличением соответствующего реактивного сопротивления или появлением дополнительного.

Предполагая такой упрощённый механизм происхождения ответа, мы предлагаем использовать метод регистрации продукта искажения отоакустической эмиссии для анализа функции внутреннего и среднего уха с позиции изменения их свойств как колебательных систем. С этой целью нами были проанализированы результаты регистрации эмиссии под воздействием серий пар чистых тонов или продукта искажения отоакустической эмиссии ПИОАЭ.

#### **Материалы и методы исследования**

Для сравнительного анализа параметров регистрации отоакустической эмиссии на частоте продукта искажения ПИОАЭ при нарушении звукопроводения нами были отобраны группы пациентов с хроническим катаром среднего уха без экссудата и экссудативным средним отитом. Патология звуковосприятия оценивалась на группе с сенсоневральной тугоухостью. Группа со смешанной тугоухостью включала в себя варианты кондуктивной и перцептивной форм. В контрольную группу вошли пациенты без нарушений слуховой функции [2].

Во время обследования наружный слуховой проход obturировался специальным вкладышем с вставленным зондом, в котором размещены компактные микрофон и телефон. Методика регистрации основана на том, что акустический стимул, состоящий из двух тональных сигналов, посылаемых в ухо через наружный слуховой проход, действует на барабанную перепонку. Её движения, в свою очередь, обуславливают колебания слуховых косточек и звуковую волну во внутреннем ухе. При этом в ответ на стимуляцию генерируются микрофонные потенциалы двух начальных тонов и дополнительного третьего [5; 6]. Учитывая нелинейность барабанной перепонки и структур среднего и внутреннего уха, обладающих упругими и вязкими компонентами, можно предполагать, что на генерацию микрофонных потенциалов влияют реактивные сопротивления этих структур. Нелинейный

ответ, как результат искажения, складывается из механоакустических преобразований в структурах среднего и внутреннего уха, обусловленных смещением барабанной перепонки, базилярной и покровной мембран, гидродинамических изменений во внутреннем ухе, а также активного ответа (мотильности) слуховых рецепторов. Факт, что источники искажений в улитке связаны с электрической генерацией микрофонного потенциала и гидродинамическими нелинейностями, отмечен многими экспериментами [7; 8].

Нарушение звукопроводения в среднем и/или внутреннем ухе сопровождается превалированием либо вязкого, либо упругого реактивных сопротивлений, что соответственно искажает нелинейный ответ. При патологии звуковосприятия с повреждением наружных волосковых клеток (НВК), возможно, происходит нарушение подвижного взаимодействия покровной и основной мембран, что, в свою очередь, увеличивает упругое реактивное сопротивление в месте повреждения [2; 9].

Описанные патологические процессы отражаются в частотно специфичном снижении амплитуды ответа, полученные звуки называют продуктом искажения ОАЭ.

Регистрация ПИОАЭ записывается в виде DP-граммы. Она отражает зависимость интенсивности продукта искажения от частоты стимуляции. Методика обладает высокой частотной специфичностью [10], что даёт реальную информацию не только о функциональном состоянии внутреннего уха, но и, учитывая описанный механизм получения продукта искажения, о состоянии системы среднего уха [11; 12].

Для сравнительного анализа DP-грамм предварительно проводилась тимпанометрия с использованием классификации по J. Jerger. При регистрации ПИОАЭ анализировались параметры амплитуды его частотных компонент: 812, 1000, 1281, 1593, 2031, 2562, 3187 и 4031 Гц. Анализ и систематизация результатов исследования приведены в виде рисунков и классификации DP-грамм (рис. 1–5).

### **Результаты исследования и их обсуждение**

В ходе исследования обследуемые были разделены на 5 групп.

**I группа** – контрольная группа из 38 здоровых пациентов. У всех была получена тимпанограмма типа «А» и высокие показатели амплитуды продукта искажения на всём частотном диапазоне используемой конфигурации (рис. 1). В этой группе средние значения амплитуды DP-стимула находились в ряду от 7,3 до 22,0 dB.

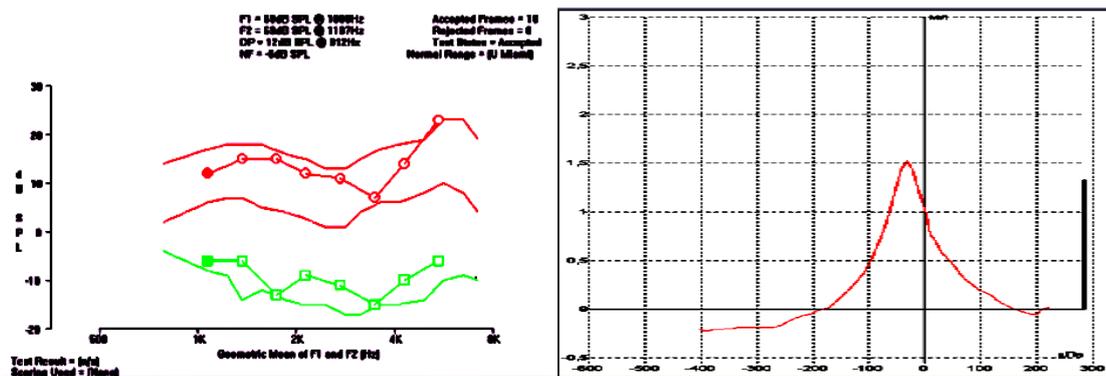


Рис. 1. А. DP-грамма нормальный тип. Верхняя зона - графическое отображение амплитуд частотных компонент продуктов искажения ОАЭ на частоте  $2f_1-f_2$  в диапазоне верхней и нижней границ соответствующей нормограммы (U Miat). Интенсивность стимулирующих тонов L1-70 и L-70 дБ УЗД; нижняя зона – уровень шума. Установленные параметры стимуляции конфигурации: Screen70/70. Б. Тимпанограмма типа «А», соответствующая нормальному типу DP-граммы

**II группа** - 35 пациентов с хроническим катаром среднего уха без экссудата и катаром с явлениями организации густого экссудата. При этом была получена тимпанограмма типа «С» и снижение амплитуды DP-стимула до отрицательных значений в зоне низких, речевых частот (рис. 2). Отклонения от нормы наблюдались в частотном ряду: 812, 1000, 1281, 1593 Гц. Средние значения амплитуды DP-стимула укладывались в ряд от -5,3 до -7,8 dB. Полученные данные отличаются от нормы и указывают на выраженное снижение остроты слуха у этой группы пациентов на низкие, частично речевые частоты. Исходя из принципа изменения реактивного сопротивления звукопроводящей среды, упругое реактивное сопротивление  $Z_y$  (или, как принято его называть, сопротивление жёсткости):  $Z_y = \frac{F_{y,o}}{v_o} =$

$\frac{E S}{\ell_o} \frac{1}{\omega}$  обратно пропорционально частоте звуковой волны и зависит от геометрии и упругих свойств самого элемента, где  $E$  – модуль упругости,  $S$  – средняя площадь поперечного сечения,  $\ell_o$  – длина элемента в ненапряженном состоянии (часть I).

Таким образом, чем больше упругое реактивное сопротивление звукопроводящей среды, тем хуже она проводит низкие частоты. Резонансная частота для этой группы пациентов смещается в сторону высокочастотного диапазона, согласно прямо пропорциональной зависимости:

$$\omega_p = \sqrt{\frac{K}{k \eta}},$$

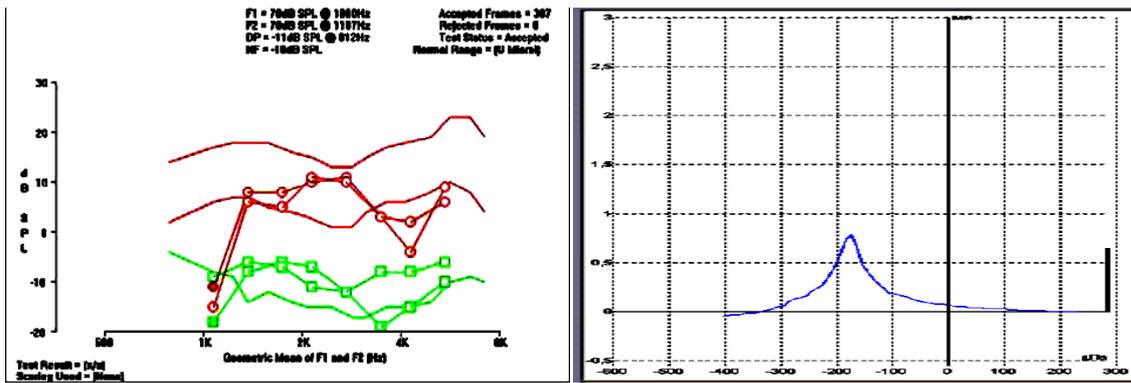


Рис. 2. А. DP–грамма восходящий тип. Конфигурация: Screen70/70. Б. Тимпанограмма типа «С» или «As», соответствующая восходящему типу DP–граммы

**III группа** – 50 пациентов с диагнозом хронического экссудативного среднего отита. Во всех случаях была получена тимпанограмма типа «В», низкие значения податливости. При регистрации ПИОАЭ наблюдалось снижение амплитуды до отрицательных значений или его непринятие с увеличением частоты стимуляции (рис. 3). Наиболее выраженные отклонения от нормы наблюдались в частотном ряду: 2031, 2562, 3187 и 4031 Гц. Средние значения амплитуды DP-стимула в этом ряду варьировали от -0,5 до -24,5 dB. Полученные цифровые данные значительно отличаются от нормы и могут указывать на плохую проводимость высоких частот звукопроводящей системой с повышенным реактивным сопротивлением вязкости (массы). На примере хронического экссудативного среднего отита снижение остроты слуха наблюдается на высокие, частично, речевые частоты. Основываясь на принципе изменений реактивных сопротивлений звукопроводящей среды, в данном случае получаем, что вязкое реактивное сопротивление  $Z_v$  при этом  $Z_v = \frac{F_{6,0}}{v_0} = k \eta \omega$  прямо пропорционально частоте и зависит от геометрии и вязких свойств элемента.

В последнем уравнении  $\omega$  – циклическая, или круговая частота, связанная с частотой  $f$  по формуле:  $\omega = 2\pi f$ ,  $\eta$  – коэффициент вязкости жидкости,  $k$  – коэффициент, определяющийся геометрией улитки (часть I).

Чем больше вязкое реактивное сопротивление среды, тем хуже проводимость высоких частот. Резонансная частота при этом смещается в сторону низкочастотного диапазона согласно обратной зависимости:  $\omega_p = \sqrt{\frac{K}{k \eta}}$ , где  $K$  – средняя жесткость упругого элемента,  $\omega_p$  – резонансная частота.

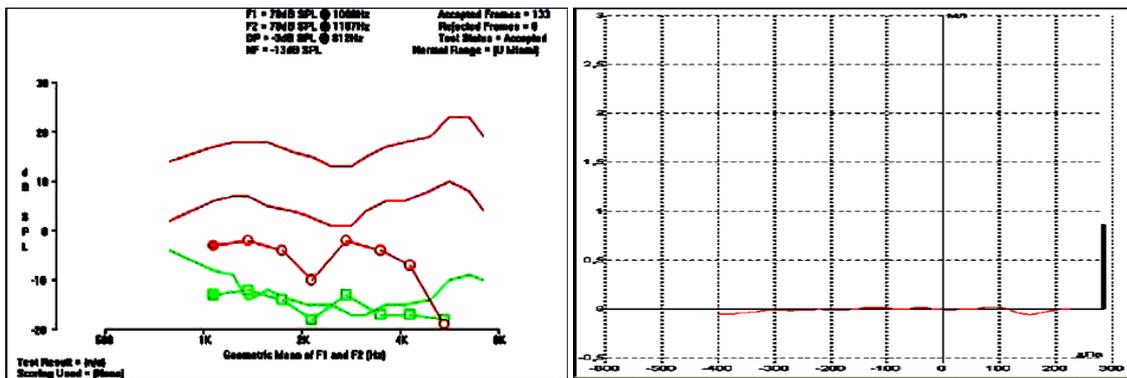


Рис. 3. А. DP–грамма нисходящий тип. Конфигурация Screen70/70. Б. Соответствующая тимпанограмма типа «В»

**IV группа** - 79 пациентов (из них 52 ребёнка) с острой или хронической сенсоневральной тугоухостью различной степени. У всех обследованных была получена тимпанограмма типа «А». На графике DP-грамм конфигурации Screen 70/70 в частотном ряду: 812, 1000, 1281, 1593, 2031, 2562, 3187 и 4031 Гц, определялось снижение амплитуды продукта искажения, соответствующее зоне повреждения НВК (рис. 4). При анализе данных средние значения амплитуды DP-стимула укладывались в ряд от 5,6 до -17,4 dB. При этом заболевании амплитудные показатели продукта искажения значительно отличаются от нормы на всём исследуемом диапазоне частот. Анализ полученных данных позволяет предположить, что при острой стадии сенсоневральной тугоухости превалирует реактивное сопротивление вязкости, что отражается на DP-грамме падением амплитуды продукта искажения в зоне высоких частот. При нарастании дегенеративных процессов увеличивается упругое реактивное сопротивление с падением амплитуды продукта искажения в сторону речевого диапазона, что увеличивает зону повреждения НВК. При этом снижается или утрачивается восприятие высоких и речевых частот.

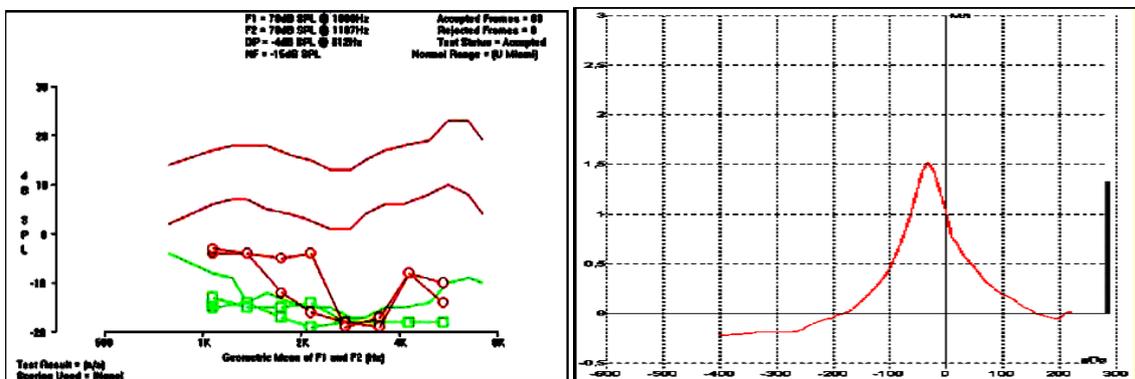


Рис. 4. А. DP-грамма регрессивный тип. Конфигурация: Screen70/70. Б. Соответствующая тимпанограмма типа «А» или «As» (у детей)

**V группа** – пациенты со смешанной тугоухостью. Сочетание кондуктивной и

перцептивной форм тугоухости отражается на DP-грамме падением амплитуды продукта искажения на всём диапазоне тестируемых частот заданной конфигурации Screen 70/70 [13; 14]. При сочетании дисфункции слуховой трубы с экссудативным процессом на DP-грамме регистрируется снижение амплитудных значений DP-стимула на всём частотном диапазоне, но максимально проявляется на тех частотах, где наиболее выражено реактивное сопротивление структур [15].

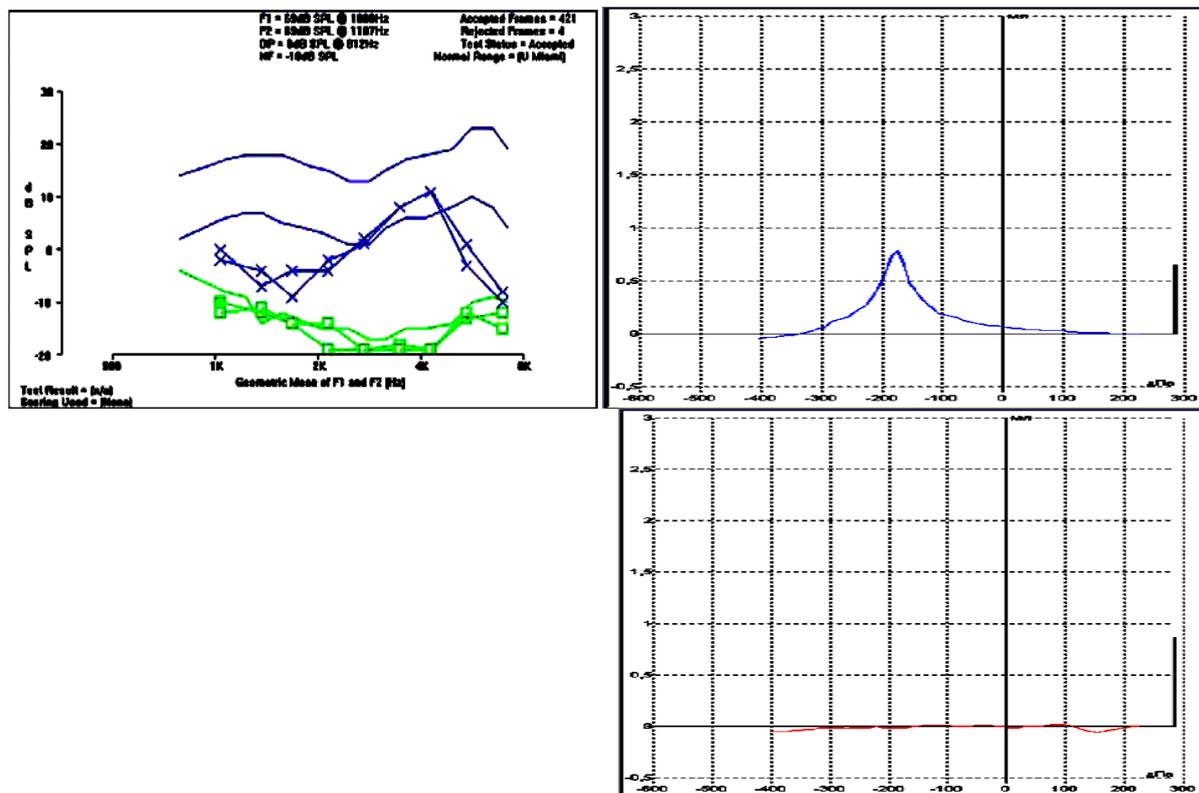


Рис. 5. А. DP–грамма смешанный тип. Конфигурация: Screen70/70. Б. Соответствующие тимпанограммы типа: «С», «В», возможно «As», «D», «E»

## Выводы

Анализ полученных результатов позволяет четко определить связь между вязкоупругими свойствами уха и соответствующими параметрами ПИОАЭ.

Для практического применения разработана классификация DP-грамм, основанная на принципе изменений реактивных сопротивлений структур среднего и внутреннего уха. Регистрация ПИОАЭ обладает высокой чувствительностью и специфичностью, благодаря чему может применяться в клинической практике.

## Список литературы

1. Аббасова А.А. Достоверность метода звуковой вызванной отоакустической эмиссии в определении состояния слуха у детей // Российская оториноларингология. – 2011. – № 5 (54).

– С. 17-20.

2. Ширьязданов Р.У., Яшин С.С. Отоакустическая эмиссия: клиническое приложение // Студенческая наука и медицина XXI века: традиции, инновации и приоритеты. Студенческая весна СамГМУ – 2016: сб. мат. X Всероссийской (84-й Итоговой) студенческой научной конференции с международным участием / Самарский государственный медицинский университет; Студенческое научное общество. – Самара, 2016. – С. 397.
3. Бобошко М.Ю., Ефимова М.В. Аспекты топической диагностики поражения слуха при пресбиакузисе // Российская оториноларингология. - 2011. - № 3 (52). - С. 23.
4. Волобуев А.Н. Основы медицинской и биологической физики. - М.: Изд. Самарский Дом печати, 2008. - С. 272.
5. Gelfand S.A. Essentials of Audiology. - NY: Thieme, 2011. - 560 с.
6. Еремина Н.В., Овчинников Е.Л., Минаева Т.И. Способ дифференциальной диагностики патологии структур среднего и внутреннего уха. Патент на изобретение RU 2484771; 27.10.2011.
7. Адылова Ф.Х., Холматов Д.И., Алиев Н.В. Факторы риска, объективная диагностика и реабилитация слуха у детей с врожденной тугоухостью // Вестник последипломного образования в сфере здравоохранения. - 2017. - № 2. - С. 77-82.
8. Минаева Т.И. Диагностика слуха в детском возрасте. - Самара: ООО «Издательство СНЦ РАН», 2008. - 58 с.
9. Давыдкин-Гогель М.М., Тарасенко Д.С. Влияние звуков повышенных интенсивностей на слух человека // Физика и медицина: создавая будущее: сборник трудов I межвузовской студенческой научно-практической конференции (Самара, 15 декабря 2017 г.). – Самара: НИЦ «Л-Журнал», 2017. – С. 131-132.
10. Паневин А.А., Журавский С.Г. Отоакустическая эмиссия как метод оценки функционального состояния слухового анализатора // Russian Scientist. – 2017. – Т. 1. № 2 (2). – С. 39-40.
11. Тарасенко Д.С., Сахнова Е.В., Давыдкин-Гогель М.М. Апикальная связка мембран улиткового протока: проблема, гипотеза и реальность // Физика и медицина: создавая будущее: сборник трудов I межвузовской студенческой научно-практической конференции (Самара, 15 декабря 2017 г.). – Самара: НИЦ «Л-Журнал», 2017. – С. 112-116.
12. Минаева Т.И., Овчинников Е.Л., Яшин С.С. Тембр тонов как качество слуха: визуализация состояния и динамики изменения // Наука и инновации в медицине. – 2018. – № 1 (9). – С. 59-65.
13. Овчинников Е.Л., Яшин С.С., Минаева Т.И. Мониторинг-контроль шумовой опасности окружающей среды // Наука и инновации в медицине. – 2018. – № 1 (9). – С. 69-72.

14. Didkovskiy V.S., Luniova S.A., Zamsha K.S. The mechanism of transmission of low-frequency sound signals otoacoustic emissions // *Электроника и связь*. – 2016. – Т. 21, № 2 (91). – С. 49-55.
15. Храбриков А.Н., Исупова Е.С. Алгоритм оценки задержанной вызванной отоакустической эмиссии // *Вятский медицинский вестник*. – 2008. – № 2. – С. 131-134.