

На правах рукописи

МАРЕЕВ Глеб Олегович

**ВОЗМОЖНОСТИ ЛАЗЕРНОГО АВТОДИННОГО
ИЗМЕРИТЕЛЯ НАНОСМЕЩЕНИЙ В ДИАГНОСТИКЕ
ЗАБОЛЕВАНИЙ УША**

(клинико-экспериментальное исследование)

14.01.03 – болезни уха, горла и носа

03.01.02 – биофизика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

доктора медицинских наук

Саратов–2012

Диссертация выполнена в ГБОУ ВПО «Саратовский государственный медицинский университет им. В.И. Разумовского» Минздравсоцразвития России

Научные консультанты:

доктор медицинских наук, профессор

Дайхес Николай Аркадьевич

доктор физико-математических наук, профессор

Усанов Дмитрий Александрович

Официальные оппоненты:

доктор медицинских наук, профессор

Магомедов Магомед Маллаевич

доктор медицинских наук, профессор

Свистушкин Валерий Михайлович

доктор медицинских наук, профессор

Кягова Алла Анатольевна

Ведущая организация: ФГБУ «Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт уха, горла, носа и речи» Министерства здравоохранения и социального развития Российской Федерации.

Защита состоится «___» _____ 2013 года в ___ часов на заседании Диссертационного Совета Д 208.059.01 при ФГБУ «Научно-клинический центр оториноларингологии ФМБА России» по адресу: 123182 Москва, Волоколамское шоссе, д. 30/6, 6 этаж, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБУ «Научно-клинический центр оториноларингологии ФМБА России» по адресу: 123182 Москва, Волоколамское шоссе, д. 30/6.

Автореферат разослан «___» _____ 2012 года

Ученый секретарь Диссертационного совета
кандидат медицинских наук:

Наумова И.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы

Широко известно, что тугоухость – весьма часто встречающаяся патология, частота которой среди населения имеет заметную тенденцию к росту в течение последних нескольких десятилетий (Тарасов Д.И. и соавт., 1984; Чекаев Г.М., 1998; Дайхес Н.А. и соавт., 2007; Wilson D. et al., 1998). Зачастую дифференциальная диагностика двух основных форм тугоухости – кондуктивной и сенсоневральной (СНТ) – весьма затруднительна (Таварткиладзе Г.А., 2003; Панкова В.Б. и соавт., 2009), нередко встречается и смешанная форма тугоухости, при лечении которой важно учитывать сравнительный вклад в потерю слуха патологии среднего и внутреннего уха, с возможным обоснованным применением для лечения микрохирургических вмешательств на среднем ухе (Дайхес Н.А., Мухамедов И.Т., 2007; Меланьин В.Д., Мухамедов И.Т., 2008; Тос М., 2008). Кроме того, в последнее время интенсивно развиваются микрохирургические слухоулучшающие оперативные вмешательства, связанные с изменением звукопроводящей цепи, а также имплантацией аппаратов прямой стимуляции структур среднего уха (Мареев О.В., 2001; Gan R.Z. et al. 2000, 2001; Bernardeschia D. et al., 2011).

На сегодняшний момент имеется лишь небольшое число объективных способов диагностики слуховой функции человека. Внедрение объективных методик напрямую связано с исследованием слуха у детей младшего возраста (Таварткиладзе Г.А., 2001, 2003, 2010; Загорянская М.Е., 2003). Высокая актуальность разработок новых объективных методик связана со все более широким распространением врожденной патологии слуха (Petit C., 1995).

В настоящее время не существует прямых методов, применимых в широкой клинической практике для оценки функции среднего уха (А.М. Huber et al., 2001). Барабанная полость, отделенная от внешнего мира барабанной перепонкой (БП) и содержащая в себе сложную механическую систему слуховых косточек, не может быть осмотрена визуально без эксплоративного вмешательства. Существующие методы исследования слуховой функции дают лишь косвенное представление о состоянии структур среднего уха. Значительная информация о состоянии структур среднего уха может быть получена путем измерения колебаний БП, соединенной с проводящей системой среднего уха. Однако пригодного для клинической практики метода измерения ее смещения так и не разработано. Подобный метод измерения колебаний должен отличаться достаточно высокой чувствительностью, так

как известно, что диапазон колебаний БП лежит в пределах сотен нанометров (Bekesy G., 1941; Khanna S.M., Tonndorf J., 1962), а также иметь высокую помехоустойчивость ввиду особенностей проведения измерений на живых объектах.

Нами для измерения смещения барабанной перепонки впервые предлагается использовать **лазерный автодинный метод**. С созданием лазерных автодинов на квантоворазмерных структурах появилась возможность проводить измерения микро- и нановибраций биологической ткани *in vivo* (Усанов Д.А. и соавт., 2003, 2011; Скрипаль А.В. и соавт., 2005; Ohtsuka Y., 1982). Кроме измерения амплитуды смещения БП при использовании данного метода возможна также объективная оценка проходимости слуховой трубы на фоне подачи в ухо зондирующего сигнала. С помощью лазерного автодинного метода возможно провести регистрацию акустического рефлекса (АР), что дает основания для разработки нового объективного метода диагностики слуховой функции, пригодного для скрининговых исследований у детей раннего возраста.

Цель исследования – обоснование, разработка и внедрение в клиническую практику нового объективного метода исследования слуховой функции на основании современных достижений в физике полупроводниковых лазеров.

Задачи исследования:

1. Разработать аппаратно-программный комплекс – лазерный автодинный измеритель наносмещений, пригодный для измерения амплитуды смещения БП, и методику его применения в экспериментальных и клинических условиях.

2. В модельном эксперименте на акустическом стенде обосновать применение лазерного автодинного измерителя наносмещений для исследования колебаний упругих мембран и определить поведение модели БП в зависимости от частоты тестового звукового сигнала и УЗД.

3. В модельном эксперименте на височных костях выявить основные особенности смещения барабанной перепонки при имитации поражений среднего уха.

4. Провести исследование смещения барабанной перепонки у отолгически здоровых лиц различного возраста в зависимости от частоты и УЗД тестового звукового сигнала.

5. Провести исследование смещения БП у больных с СНТ и исследовать основные зависимости смещения БП от частоты тестового сигнала и УЗД с целью выявления основных дифференциально-диагностических критериев.

6. Провести исследование смещения БП у больных с кондуктивной тугоухостью различного генеза (отосклероз, адгезивный отит, тубоотит, острый неперфоративный средний отит, хронический гнойный средний отит) в зависимости от частоты и УЗД тестового звукового сигнала с целью выявления основных дифференциально-диагностических критериев и разработать метод их графической интерпретации.

7. Создать трехмерную модель движений БП, пригодную для визуализации данных, полученных при измерении смещения БП в различных отделах.

8. Определить дифференциально-диагностические критерии проходимости слуховой трубы при исследовании смещения БП лазерным автодинным методом.

9. Оценить возможности регистрации АР среднего уха при помощи лазерного автодинного измерителя наносмещений.

Научная новизна работы

Впервые в мировой практике разработан аппаратно-программный комплекс для лазерного автодинного измерения наносмещений и методики его применения при измерениях на живых объектах с учетом специфики работы данного метода исследования.

В работе впервые получены данные о смещении БП в различных отделах при помощи лазерного автодинного измерителя наносмещений, и рассмотрены вопросы зависимости состояния колебательной системы среднего уха от возраста человека; получены дифференциально-диагностические критерии различной патологии уха при использовании лазерного автодинного метода измерения смещения БП.

Впервые на основании результатов измерений лазерным автодинным методом создана трехмерная модель движений БП. Впервые применен лазерный автодинный метод для объективной диагностики проходимости слуховой трубы и разработаны критерии оценки его результатов.

Впервые лазерный автодинный метод измерения смещения БП применен для регистрации АР.

Теоретический вклад

Получены новые фундаментальные знания о механизме колебания БП, микромеханике среднего уха, а также ее отличиях при различных патологических состояниях.

Практическая значимость

Создан аппаратно-программный комплекс для лазерного автодинного измерения наносмещений с возможностью его применения для измерения амплитуды смещения БП человека, как в различных модельных опытах, так и в клинической практике. Разработана методика его применения, вспомогательные устройства для реализации метода в клинической практике. Определены дифференциально-диагностические критерии различных патологических состояний уха и разработан дифференциально-диагностический график для определения патологии уха при наличии костно-воздушного интервала на аудиограмме. Разработана трехмерная модель движений БП, которая может использоваться для визуализации результатов исследования.

Применена на практике методика исследования функции слуховой трубы с помощью лазерного автодинного измерителя наносмещений, даны объективные критерии оценки ее проходимости.

Показана возможность регистрации АР при помощи измерения амплитуды смещения БП, что открывает возможности для создания нового объективного метода диагностики слуховой функции.

Реализация результатов исследования

Результаты исследования внедрены в лечебную деятельность клиники оториноларингологии Клинической больницы им. С.Р. Миротворцева ГБОУ ВПО «Саратовский ГМУ им. В.И. Разумовского» Минздравсоцразвития России (взрослое оториноларингологическое отделение и клинικο-диагностическое оториноларингологическое отделение), на базе ЛОР-отделений МУЗ «Городская больница №6 им. акад. В.Н. Кошелева» и МУЗ «Городская клиническая больница №10» (г. Саратов).

Результаты исследования внедрены в учебный процесс ГБОУ ВПО «Саратовский ГМУ им. В.И. Разумовского» Минздравсоцразвития России в курсе оториноларингологии для лечебного, педиатрического, стоматологического и медико-профилактического факультета; ФПК и ППС.

Апробация диссертации

Основные положения диссертации были доложены в виде научных докладов на заседании Саратовского областного отделения Российского научного общества оториноларингологов (Саратов, 2007, 2008, 2010, 2011), Всероссийских научно-практических конференциях в Санкт-Петербурге (2004, 2009, 2010, 2012), Всероссийской конференции «Современные аспекты и перспективы развития оториноларингологии» г. Москва (2005), региональных научно-практических конференциях в г. Нижний Новгород (2006, 2008), г. Самара (2008, 2010), г. Челябинск (2010); на конференциях молодых ученых Саратовского государственного медицинского университета (2005, 2006, 2007, 2008, 2009, 2010, 2011, 2012 гг.); на Международной молодежной научной школе «Современные биоинженерные и ядерно-физические технологии в медицине» (2012 г.) и Всероссийской научной школе-семинаре «Методы компьютерной диагностики в биологии и медицине» г. Саратов (2011, 2012 гг.).

Проект был представлен на международной выставке EUREKA в Брюсселе (52nd World Exhibition Of Innovation, Research And Technology, Brussels, 16.11.2003), где был удостоен серебряной медали (Medaille d'argent). Прибор награжден золотой медалью на IV Московском Международном салоне инноваций и инвестиций (г. Москва, Всероссийский выставочный центр, 25–28 февраля 2004 г.).

Устройство и методика удостоены серебряной медали II Саратовского Салона изобретений, инноваций и инвестиций (2006 г.), также экспонировался на III Саратовском Салоне изобретений, инноваций и инвестиций (2007 г.). Проект был представлен на IV Всероссийском форуме «Здоровье нации – основа процветания России» (2008 г.). Результаты исследований были доложены на международной конференции «Биомеханика 2010» (г. Саратов).

Исследования по тематике диссертационной работы поддержаны грантом Фонда содействия развитию малых предприятий в научно-технической сфере по программе «У.М.Н.И.К.» 2008-2012.

Апробация диссертации состоялась на совместном заседании кафедры оториноларингологии ГБОУ ВПО «Саратовский ГМУ им. В.И. Разумовского» и кафедры физики твердого тела ФГБОУ ВПО «СГУ им. Н.Г. Чернышевского» 24.02.2012 г.

Публикации

По теме диссертации опубликовано 42 печатных работы, из них 17 – в изданиях, рецензируемых ВАК Минобрнауки РФ (2 из них дополнительно переведены на иностранный язык); также получены 1 патент на изобретение и 2 патента на полезную модель.

Личный вклад автора

Непосредственно при участии соискателя проведены все модельные опыты – на макете БП, на препаратах височных костей свиньи, препаратах височных костей человека. Автором, совместно с сотрудниками кафедры физики твердого тела Саратовского государственного университета, выполнены все акустические измерения, приведенные в работе. Непосредственно при участии автора изготовлены установка и ее программное обеспечение; устройства для ее крепления на голову обследуемого и на операционный микроскоп разработаны автором лично. Все проведенные измерения на живых лицах, представленные в работе, выполнены автором лично. Моделирование БП проведено при участии автора, на основании представленных данных, полученных в исследовании.

Объем и структура диссертации

Диссертация состоит из введения, обзора литературы, одной главы с описанием физических основ лазерного автодинного метода исследования колебаний и его математического аппарата, двух глав собственных исследований, заключения и списка литературы. Общий объем диссертации составляет 294 страницы, она содержит 40 таблиц и иллюстрирована 57 рисунками.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Лазерный автодинный метод измерения смещения БП – ценный новый объективный диагностический метод, позволяющий дать оценку состояния структур среднего уха, слуховой трубы, исследовать АР.

2. Картина колебаний БП у отологически здоровых лиц при звуковой стимуляции носит весьма сложный характер, зависящий от частоты и интенсивности звукового воздействия; наиболее репрезентативной с диагностической точки зрения является область *umbo* БП. Смещения БП в области *umbo* находятся в пределах от 134 до 362 нм на частотах ниже 1500 Гц; от 105 до 172 нм на частотах 2000-4000 Гц с падением в этой области

спектра крутизной 3 дБ/окт при УЗД 85 дБ; характеристика зависимости нарастания амплитуды смещения БП от роста интенсивности звукового воздействия носит логарифмический характер. Подвижность структур среднего уха у отологически здоровых лиц, не изменяется в возрастных группах от 16 до 82 лет

3. Лазерный автодинный метод измерения смещения БП может быть использован в клинической практике для дифференциальной диагностики различных заболеваний среднего уха; смещение БП при СНТ различного генеза не изменяется статистически значимо относительно отологически здоровых лиц.

4. Модель движений БП может быть использована в практической деятельности для визуализации движения БП в реальном времени в контрольно-измерительных системах.

5. Лазерный автодинный метод измерения смещения БП является объективным методом диагностики функции слуховой трубы.

6. Регистрация АР при помощи лазерного автодинного метода измерения смещения БП – новый объективный метод диагностики слуховой функции.

Содержание работы

Использование эффекта автодинного детектирования в полупроводниковых лазерах для создания на их основе простых измерительных датчиков с высокой чувствительностью к отраженному сигналу представляется весьма привлекательным. Измерительные системы на основе автодинов обладают высокой точностью, компактны и надежны, они позволяют проводить измерения в широком диапазоне величин, включая нанометровые измерения (Усанов Д.А. и соавт., 2003; 2011). Автодинный эффект основан на изменении режима работы лазерного диода при возвращении части излучения обратно в его резонатор, данная система обладает высокой чувствительностью к отраженному сигналу. Упрощенно автодинную систему можно рассматривать как составной резонатор Кобаяши-Ленга (Lang R., Kobayashi K., 1980), состоящий из двух резонаторов Фабри-Перо.

Затруднения в практическом применении автодинных систем заключаются в существенном отличии автодинного сигнала от сигнала интерференционной лазерной системы с развязкой от источника излучения, что затрудняет применение для описания его работы хорошо разработанной

теории гомодинной интерферометрии. Для анализа автодинного сигнала в предположении гармоничности колебаний БП использовалась известная процедура разложения интерференционного сигнала в ряд по функциям Бесселя и в ряд Фурье (Усанов Д.А. и соавт., 2004, 2007; Скрипаль А.В. и соавт., 2005, 2008). Амплитуду смещения БП определяют по спектру автодинного сигнала. В ряде работ установлена зависимость амплитуды гармоники, имеющей максимальное значение в спектре автодинного сигнала, от амплитуды колебаний БП. В зависимости от амплитуды колебаний БП в спектре сигнала максимальным значением будут преобладать гармоники с различными номерами. В зависимости от этого, существует несколько методов расчета амплитуды колебаний БП по спектру автодинного сигнала.

В состав измерительной лазерной автодинной системы (принципиальная схема устройства – *рис.1*) входит автодинный лазерный диод типа RLD-650 на квантоворазмерных структурах с дифракционно-ограниченной одиночной пространственной модой с характеристиками: мощность излучения 5 мВт, длина волны 652 нм.

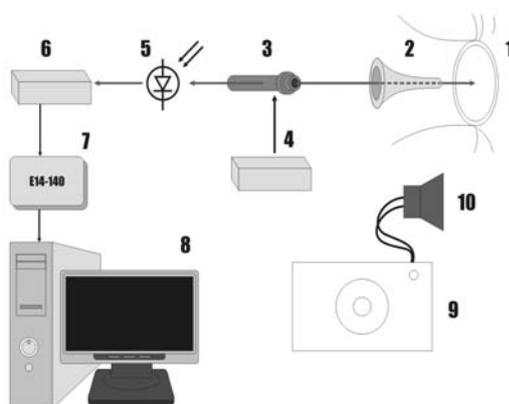


Рис.1. Принципиальная схема работы лазерного автодинного измерителя колебаний БП (пояснение в тексте).

При клинических измерениях лазерный диод был заменен нами на сертифицированный прибор для лазеротерапии в оториноларингологии «ЛАСТ-ЛОР» (ООО «Трима», г. Саратов), имеющий в своем составе аналогичный по параметрам полупроводниковый источник лазерного излучения. Прибор использовался в паспортном режиме – немодулированной лазерной генерации красным полупроводниковым лазером видимого диапазона. На БП 1 направлено когерентное излучение от источника лазерного излучения 3, питаемого от источника тока 4. Для обеспечения прямой видимости БП использована воронка 2. Отраженное от БП 1 лазерное излучение регистрируется с помощью фотоприемника 5. Сигнал с фотоприемника по-

ступает через широкополосный усилитель, содержащий фильтр переменного сигнала 6 в аналого-цифровой преобразователь 7 и затем – в персональный компьютер 8, где специальной программой производится обработка его сигнала – построение спектра автодинного сигнала и по команде оператора – вычисление амплитуды колебаний БП. Сигнал подается при помощи генератора звукового сигнала 9 с усилителем в громкоговоритель 10, таким образом, все исследование проходит в свободном звуковом поле. В качестве аналого-цифрового преобразователя нами был использован выносной портативный USB модуль E14-140 (L-Card, Россия). Для обработки сигнала нами была использована оригинальная программа математического анализа спектра автодинного сигнала «Виброметр – многофункциональный СВЧ и лазерный измерительный комплекс для решения задач нано- и биомедицинских исследований», разработанная на кафедре физики твердого тела Саратовского государственного университета.

Для измерения подвижности БП в клинических экспериментах использовалась лазерная автодинная установка, укрепленная на голове обследуемого при помощи устройства для фиксации ее на голове обследуемого (патент РФ на полезную модель №95997). Для большей точности измерения, возможности интраоперационного использования методики, измерения в различных частях БП нами был разработан вариант установки лазерного автодинного измерителя на операционный микроскоп фирмы «Karl Zeiss» (патент РФ на полезную модель №88537).

В ходе подобных исследований необходим постоянный контроль акустических параметров среды. Особенностью исследования является необходимость контроля уровня звукового давления (УЗД) как в помещении, где находится испытуемый, так и в ограниченных объемах – в наружном слуховом проходе. Приводимые в работе УЗД даны в дБ относительно уровня $2 \cdot 10^{-5}$ Па. Для проведения измерений нами применялся комплекс прецизионных измерительных приборов фирмы Bruel & Kjaer (Дания). Для определения УЗД в ограниченном объеме нами использовался набор акустических зондов UA 0040. Калибровка произведена в соответствии с паспортом используемой измерительной аппаратуры.

В клинической части нашего исследования всем обследуемым проводилось тщательное клиническое обследование, которое включало в себя традиционный осмотр ЛОР органов. Для получения более точной информации о состоянии БП лицам с патологией слуха применялся осмотр уха под увеличением с использованием лупы, воронки Зигле, эндоскопа, операцион-

ного микроскопа. Полученная микроскопическая картина БП схематично фиксировалась в картах обследования (при наличии перфораций), либо делались выводы о наличии адгезивных явлений в среднем ухе. При наличии адгезивных явлений и ТО больным также проводились проба Вальсальвы, а также пробы с помощью воронки Зигле, продувание по Политцеру с микроскопическим визуальным контролем БП.

Аудиологические методы обследования включали в себя исследование разговорной и шепотной речью, камертонами и проведение тональной пороговой аудиометрии. Аудиологические методы исследования были проведены всем обследуемым. Аудиометрия проводилась самостоятельно автором при помощи аудиометров Interacoustics MA-30 (Дания), «Биомедилен» АА-02.

Данные, полученные в результате исследований, заносились нами в электронные таблицы Microsoft Excel 2003/2007, статистическая обработка результатов исследования проводилась в пакете Statsoft Statistica 7.0. Нами использовались общепринятые методики статистической обработки результатов – вычисление в группах средних арифметических (M), дисперсии, стандартного отклонения ($\pm m$). Статистическая достоверность отличий в выборках оценивалась по двухвыборочному t -критерию Стьюдента; доверительный интервал при этом выбран $p=0,05$. Повторяемость/воспроизводимость результатов исследования оценивалась стандартным методом Gage R&R.

Результаты собственных исследований и их обсуждение

Результаты экспериментальных исследований

Для проверки работоспособности установки и прогнозирования результатов измерений нами были проведены модельные опыты на модели височной кости, содержащей имитацию БП, наружного слухового прохода и полостей среднего уха. Между имитацией слухового прохода и полостью в стенде помещена имитация БП (диаметром 11 мм), изготовленная из полиэтиленовой пленки толщиной 100 мкм. Вся модель при помощи винта может быть жестко прикреплена к подвижной системе лазерной автодинной установки вместо ушной воронки, что обеспечивает ее точное и быстрое сопряжение с измерительной установкой. Акустический зонд для контроля создаваемого давления вводился в имитатор наружного слухового прохода, само исследование проходило в свободном звуковом поле.

Было проведено 50 измерений в центральной части мембраны макета при УЗД 65 и 85 дБ, при этом была получена амплитудно-частотная характеристика данной модели при соответствующих УЗД. Исследования проводились многократно и тремя различными экспериментаторами в разное время, для последующей оценки воспроизводимости и повторяемости результатов опыта. Выявлено, что собственные резонансные частоты макета БП 400 Гц и 600 Гц. Наибольшая амплитуда смещения макета составила 701 нм. Наибольшая амплитуда колебаний зарегистрирована в области 250–800 Гц, затем амплитуда колебаний носит приблизительно одинаковый характер, колеблясь в области 100–274 нм. В ряде случаев регистрировалась большая амплитуда смещения модели при создании меньшего УЗД, а некоторые амплитуда весьма малы по сравнению с соседними частотами, что соответствует теории колебания свободной упругой мембраны с формированием различных вибрационных портретов в зависимости от частоты колебаний и УЗД. При этом смещение центральной точки мембраны не всегда является максимальным по всей площади мембраны. Подобная модель не в полной мере отражает колебания БП человека, так как последняя отличается значительной анизотропностью строения и нагружена на цепь слуховых косточек и внутреннее ухо. При исследовании колебаний модели БП, нагруженной на замкнутый объем среднего уха, отмечается значительное уменьшение амплитуды колебаний, выравнивание амплитудно-частотных характеристик (АЧХ). Регистрируется второй резонансный пик в области 800 Гц, отмечаются также более значительные флюктуации колебаний в области свыше 850–1000 Гц.

Результаты исследований показывают в среднем хорошую повторяемость экспериментов, однако имеется достаточно широкая дисперсия результатов от эксперимента к эксперименту. Общая вариабельность результатов по данным теста Gage R&R составляет от 25,56% до 34,25%, что является «приемлемым для экспериментальной измерительной аппаратуры». Отмечается также хорошая общая повторяемость и воспроизводимость эксперимента 87,56–96,21%.

В целях проведения исследования *in vitro* на нативном свежем препарате височных костей нами были использованы височные кости домашних свиней (*Sus scrofa domesticus*), ввиду их схожести с человеческими по анатомии и микромеханике среднего уха (Pracy J.P. et al., 1998). Всего измерения проведены на 7 животных (13 ушей). Использовались височные кости животных, время с момента смерти которых до проведения эксперимента не

превышало 3–4 часов. На интактных препаратах для получения адекватного доступа к БП долотами и бором практически полностью удалялись хрящевая и костная части наружного слухового прохода. При исследовании на изолированном препарате БП барабанная полость при помощи бормашины вскрывалась с внутренней стороны после удаления костного лабиринта, аккуратно удалялись слуховые косточки, и становилась доступна для исследования изолированная БП. Для имитации адгезивного процесса на область наковаленно-молоточкового сустава наносилась капля резинового клея. При исследовании снималась вибрационная амплитудно-частотная характеристика БП интактного препарата при УЗД 65 и 85 дБ.

При исследовании интактного уха (9 препаратов) обнаружено, что в низкочастотной области АЧХ БП наблюдаются четыре максимума, очевидно соответствующие четырем резонансным частотам данной системы – 375, 475, 550 и 675 Гц. Максимальная зарегистрированная амплитуда составила 257 нм на частоте воздействия 550 Гц при УЗД 85 дБ.

При исследовании изолированной БП (2 препарата) было обнаружено, что БП, не нагруженная на цепь слуховых косточек и структуры внутреннего уха, имеет гораздо больший размах колебаний и некоторые собственные резонансные частоты, отличные от частот собственного вибрационного резонанса системы интактного уха домашней свиньи. Для «свободной» БП при УЗД 65 дБ на АЧХ наблюдаются максимумы амплитуды колебаний на частотах 370 и 575 Гц, с увеличением звукового давления на 10 дБ – равномерное увеличение амплитуды смещения БП во всей области исследуемых частот, за исключением области вблизи 700 Гц, где наблюдается появление дополнительной резонансной частоты. Максимальная зарегистрированная амплитуда составила 505 нм на частоте воздействия 425 Гц при УЗД 85 дБ. При имитации адгезивных процессов в барабанной полости (2 препарата) была получена АЧХ БП с достоверным снижением максимальной амплитуды смещения БП до 80–100 нм, по сравнению с интактным препаратом височной кости домашней свиньи, явления резонанса выражена на частотах 400–600 Гц.

Для исследования поведения БП при высоких уровнях звукового давления анализировался спектральный состав автодинного сигнала при различных интенсивностях воздействия. В спектре автодинного сигнала при исследованиях на интактном препарате височной кости домашней свиньи наряду со спектральными составляющими, кратными частоте возбуждающего звукового воздействия, нами нередко наблюдались спектральные состав-

ляющие на частотах кратных половине частоты возбуждающего звукового воздействия. Это позволило сделать вывод о возникновении при гармонических колебаниях БП дополнительной субгармоники на частоте кратной $\frac{1}{2}$ частоты основных колебаний.

С учетом полученных данных нами были дополнительно проведены исследования возможности возникновения субгармонических колебаний БП на интактном препарате височной кости свиньи. Для возбуждения колебаний БП использовался костный телефон, применяемый в аудиометрических клинических исследованиях (уровень сигнала подан в данном случае по величине напряжения переменного тока, подаваемого на костный телефон), что позволило нам создать амплитуду колебаний препарата большую, чем при воздушной передаче звука. При увеличении напряжения подаваемого сигнала до величины 0,9 В в спектре автодинного сигнала наблюдались субгармонические составляющие на частотах кратных половине частоты подаваемого сигнала; при увеличении напряжения подаваемого сигнала до величины 2,0 В в спектре автодинного сигнала наблюдались дополнительные субгармонические составляющие на частотах, кратных $\frac{1}{4}$ частоты подаваемого сигнала. Проведенные исследования позволяют установить условия возбуждения нормальных колебаний БП и порог адекватного восприятия звукового сигнала.

Измерения на свежих препаратах трупных височных костей человека проведены нами для доказательства экспериментального сходства модельных опытов, поставленных на височных костях домашней свиньи, с исследованиями, проводимыми на людях. Использовались 2 свежих препарата височных костей человека, взятые через 8–12 часов с момента смерти. АЧХ БП препарата височной кости человека снималась при УЗД 85 дБ в диапазоне частот от 500 до 3500 Гц. Наибольшие величины колебания БП в данном случае составили 100–120 нм на частотах 1500–2500 Гц. Исследовались также величины смещения БП при нарастании УЗД в диапазоне 45–85 дБ на частоте 1000 Гц. Измеренная зависимость нарастания амплитуды колебаний БП от УЗД носит степенной характер.

Таким образом, из сопоставления результатов модельных опытов можно сделать вывод, что диагностика нарушения передаточной функции в цепи «БП – слуховые косточки» возможна по спектральной картине амплитудного отклика БП на звуковую нагрузку различной интенсивности, измеренной при помощи лазерного автодинного измерителя наносмещений.

Результаты клинических исследований

Клиническая часть исследования проведена на базе клиники оториноларингологии Клинической больницы им. С.Р. Миротворцева ГБОУ ВПО «Саратовский государственный медицинский университет им. В.И. Разумовского» Минздравсоцразвития России (взрослое и клинико-диагностическое оториноларингологические отделения) и ЛОР-отделения МУЗ «Городская Больница №6 им. акад. В.Н. Кошелева» (г. Саратов). Всего нами было обследовано 207 человек (257 ушей), разделенных на 7 основных групп по наличию различной патологии слуха или ее отсутствию:

1. Контрольная группа (ОЗЛ) – 100 ушей.
2. Больные сенсоневральной тугоухостью (СНТ) – 65 ушей.
3. Больные адгезивным отитом (АО)– 20 ушей.
4. Больные отосклерозом (ОС) – 12 ушей
5. Больные острым средним отитом (ОСО)– 20 ушей.
6. Больные хроническим гнойным средним отитом (ХГСО) – 20 ушей.
7. Больные тубоотитом (ТО) – 20 ушей.

Контрольную группу (ОЗЛ) составили 50 человек без сведений о наличии патологии уха в анамнезе и имеющие нормальный слух по данным аудиологического обследования. Возраст обследуемых в этой группе колеблется от 15 до 80 лет. Соотношение по полу в данной группе равно. Измерения у ОЗЛ проведены на обоих ушах (всего 100 ушей), у всех больных обследовалось только одно ухо.

Группу больных *хронической сенсоневральной тугоухостью* (СНТ) составили 65 человек с одно- или двусторонними поражениями органа слуха. При отоскопии в данной группе не было отмечено признаков поражения среднего уха, по данным аудиологического обследования тугоухость носила исключительно сенсоневральный характер, с характерными изменениями на аудиограмме – снижение порогов костной и воздушной проводимости, отсутствие костно-воздушного интервала. Возраст обследованных в этой группе колеблется от 18 до 80 лет, средний возраст больных – 61,5 лет.

Группу больных *адгезивным отитом* (АО) составили 20 больных с одно- и двусторонними поражениями среднего уха. В группу больных АО вошли лица, у которых отмечалось наличие рубцовых изменений, втянутости БП (при микроотоскопии с применением операционного микроскопа или эндоскопа для осмотра уха), а также характерные изменения, обнаруженные при аудиометрическом обследовании – снижение порога воздушной прово-

димости, наличием на аудиограмме значительного костно-воздушного интервала (от 10дБ до 60 дБ, в среднем 20–30 дБ).

Группа больных *отосклерозом* (ОС) представлена 12 больными (тимпанальная форма), диагноз подтвержден при последующем оперативном вмешательстве. Все обследованные больные имели изменения на аудиограмме, характерные для кондуктивной тугоухости, положительные данные камертональных опытов (Желли, Бинга).

Группу больных *острым средним отитом* (ОСО) составили 20 больных. Диагноз был поставлен на основании жалоб на снижение слуха, шум в ухе, боли в ухе, наличия клинических признаков острого среднего отита, при этом обязательным для включения в данную группу было отсутствие признаков перфорации БП; при аудиологическом обследовании зафиксированы изменения на аудиограмме, характерные для выраженной кондуктивной тугоухости.

В группу больных *хроническим гнойным средним отитом* (ХГСО) вошли 20 больных, как с гнойными мезотимпанитами (12 больных), так и с гнойными эпитимпанитами (8 больных). Для более точной диагностики всем больным проводилась микроотоскопия при помощи операционного микроскопа или эндоскопа.

Нами проводились измерения при *нарушении проходимости слуховой трубы* (тубоотите – ТО) у 20 больных двухсторонним ТО. Диагноз в этой группе был поставлен клинически на основании наличия выраженной втянутости БП при отоскопии и на основании микроотоскопии, отрицательных результатов проб с пустым глотком, проб Вальсальвы и Тойнби, что сочеталось с признаками кондуктивной тугоухости на аудиограмме. Всего в группе больных с ТО обследовано 20 ушей.

Критериями для исключения из исследования служили наличие тяжелой сопутствующей патологии, системных и наследственных заболеваний, а также случаи с недостаточной или сомнительной клинической идентификацией основного отиатрического диагноза.

Исследования подвижности БП и вибрационных свойств интактного среднего уха проводилось нами в области *umbo* на частотах 300, 500, 800, 1000, 1200, 1500, 1800, 2000, 2200, 2500, 2800, 3000, 3200, 3500, 3800, 4000 Гц. На каждой частоте проводилось измерение при создании УЗД в наружном слуховом проходе 30, 55, 75, 85 дБ (рис. 2). Статистически значимой разницы при сравнении амплитуды смещения БП правого и левого уха нами не отмечено.

Наибольшая амплитуда смещения наблюдается при стимуляции частотами в области до 1000–1500 Гц, свыше 1800 Гц наступает падение амплитуды смещения БП с крутизной 2,5 дБ/окт. Минимальные значения амплитуды смещения БП отмечаются в области высоких частот – 3000–4000 Гц. У всех больных проводилось только исследование АЧХ БП в области *umbo* на частотах 300–4000 Гц, при фиксированном значении УЗД 85 дБ (табл. 1).

При исследовании характера изменения колебаний БП с нарастанием УЗД отмечалось, что амплитуда колебаний нарастает совместно с ростом УЗД, характер нарастания – степенной, практически на всех частотах, при этом нарастание происходит с различной скоростью. Нарастание амплитуды смещения на высоких частотах (4000 Гц) происходит до меньших цифр, чем на низких частотах, и кривая имеет более пологий характер (рис. 3а). На рис. 3б представлена та же зависимость, но при расчете звукового давления в абсолютных величинах (Па). У всех больных исследование этой зависимости проводилось только на частоте 1000 Гц.

При сравнении амплитудно-частотной вибрационной характеристики в различных возрастных группах у ОЗЛ нами практически не было обнаружено отличий, что свидетельствует об отсутствии изменений в микромеханике среднего уха и физических параметрах БП с возрастом.

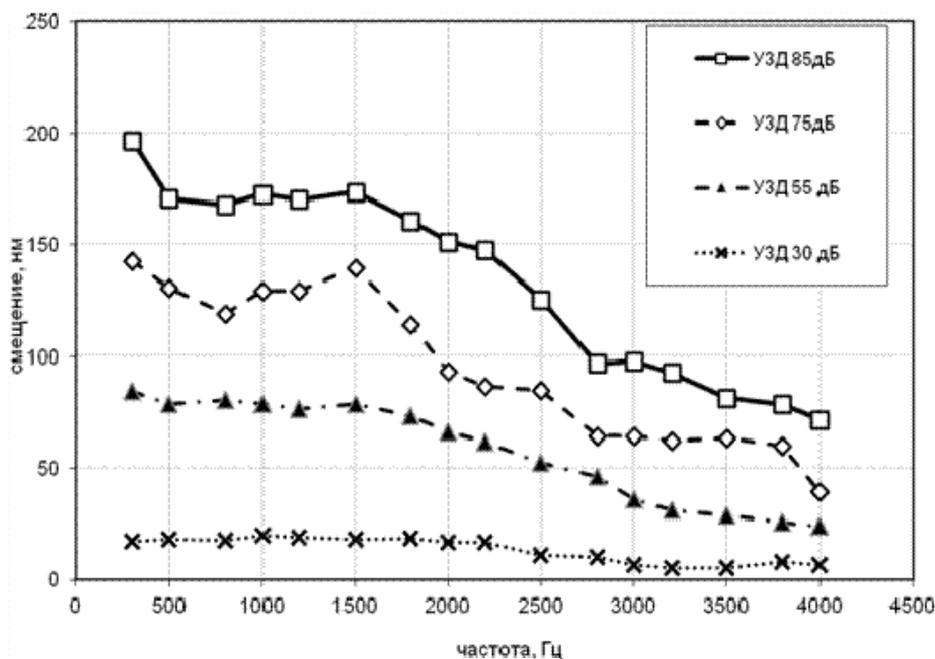


Рис. 2. Средние АЧХ интактного среднего уха человека, измеренные в области *umbo* у ОЗЛ, при создании различного УЗД в наружном слуховом проходе, в частотном диапазоне 250–4000 Гц со стимуляцией в свободном звуковом поле (всего 100 ушей).

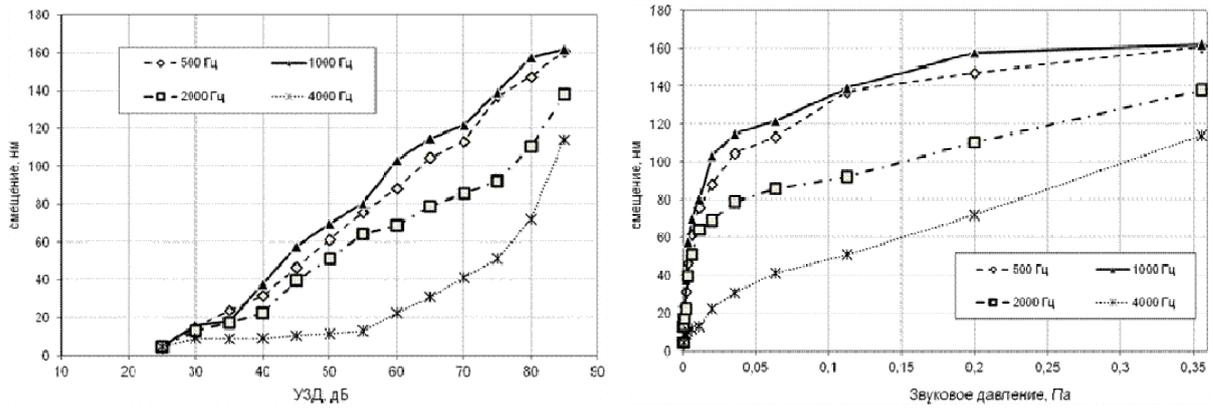


Рис. 3. а) зависимость амплитуды смещения БП от УЗД на различных звуковых частотах со стимуляцией в свободном звуковом поле; б) зависимость амплитуды смещения БП от звукового давления (в абсолютных единицах) на различных звуковых частотах со стимуляцией в свободном звуковом поле (по оси абсцисс отложены абсолютные величины звукового давления в Па).

Оценка воспроизводимости и повторяемости данных (взяты результаты измерения на частотах 500 и 1000 Гц) по тесту Gage R&R дает показатели 25–31% вариации данных, что является «приемлемым для экспериментальных приборов».

Измерение амплитуды смещения БП в области *umbo* лазерным автодинным методом у больных с СНТ не выявило никаких статистически достоверных отличий от группы ОЗЛ. В качестве оценки изменений на АЧХ использовалось отношение амплитуды смещения БП у больных к амплитуде смещения, зарегистрированной на данной частоте в группе ОЗЛ. Сравнение величины костно-воздушного интервала для различных частот, измеренного по данным аудиометрии и описанного соотношения, дает возможность характеризовать связь изменений на аудиограмме и зафиксированных при измерении изменений амплитуд смещения БП. Коэффициент линейной корреляции составляет $k=-0,06$, таким образом, в группе больных с СНТ изменения слуха на аудиограмме не связаны с изменением амплитуды смещения БП в области *umbo*.

У больных АО отмечается снижение амплитуды смещения БП по всему диапазону частот, причем снижение тем более выражено, чем больше потеря слуха по аудиограмме (рис. 4). В диапазоне частот менее 2500 Гц амплитуда смещения БП в области *umbo* статистически достоверно отличается у больных АО с падением порогов воздушной проводимости по аудиограмме более 40 дБ. У больных АО со снижением порогов воздушной проводимости до 40 дБ статистически значимые отличия обнаружены нами на частотах 300 Гц,

2000–2500 Гц. Больные АО разделены нами на 3 подгруппы по величине костно-воздушного интервала на аудиограмме на частоте 1000 Гц. Нарастание амплитуды смещения с ростом УЗД происходит у них более медленными темпами, ниже 35 дБ не удается зафиксировать смещения БП. Различия от ОЗЛ статистически достоверны в области значений УЗД меньших 70 дБ. Коэффициент линейной корреляции между костно-воздушным интервалом на аудиограмме и изменениями амплитуд смещения БП составляет $k=0,33-0,61$ (в различных подгруппах – в зависимости от степени потери слуха на аудиограмме), что свидетельствует о наличии сильной связи изменений на аудиограмме (костно-воздушного интервала) с изменениям АЧХ БП. Размах костно-воздушного интервала на соответствующих частотах коррелирует с изменениями амплитуды смещения БП в области *imbo*. Таким образом, изменения слуховой функции у больных АО взаимосвязаны с зарегистрированными нами изменениями в амплитуде смещения БП в области *imbo* и являются отражением изменения микромеханики структур среднего уха и изменения параметров их колебательной системы. Результаты исследования амплитуды смещения в данных группах приведены в *табл. 1*.

Обследование в группе больных ОС не обнаружило статистически значимых отличий от ОЗЛ, хотя в данной группе амплитуда смещения *imbo* находится в отрицательном сегменте вариаций нормативных значений на частотах до 2000 Гц. При исследовании нарастания амплитуды смещения БП в области *imbo* от роста УЗД нами также не зафиксировано статистически достоверных отличий. Указанные явления объясняются большой подвижностью в суставах (в частности, наковаленно-молоточковом суставе) между слуховыми косточками. Изменения в данном случае при фиксации одного конца вибрирующей механической цепи не будут носить значимого характера при измерении смещения на другом ее конце.

У больных ТО отмечается снижение амплитуды колебаний БП на частотах ниже 1000 Гц. Явления резонанса подвижной системы среднего уха при ТО отмечаются на частотах 1000–2500 Гц. Отмечается снижение амплитуды БП на всех уровнях УЗД относительно ОЗЛ в области сравнительно малых УЗД – до 50 дБ, что, скорее всего, объясняется незначительной абсолютной флюктуацией результатов измерения смещений при подобных УЗД. Это объясняется тем, что статистически значимые отличия в амплитуде смещения БП наблюдаются на частотах ниже 1000 Гц.

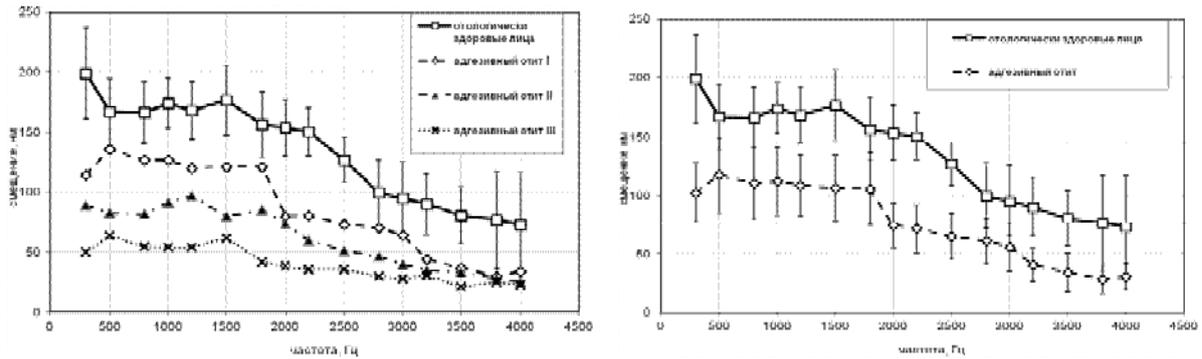


Рис. 4. Средние АЧХ БП, измеренные в области *imbo* у больных АО, в сравнении с АЧХ ОЗЛ, УЗД 85 дБ, для ОЗЛ обозначены стандартные отклонения ($\pm m$): а) представленные по трем подгруппам в зависимости от снижения порогов воздушной проводимости на аудиограмме, б) у всей группы больных АО.

Таблица 1

Амплитуды смещения БП в области *imbo* ($M \pm m$, нм), измеренные при УЗД 85 дБ у больных АО и СНТ, в сравнении с ОЗЛ

Частота, Гц	ОЗЛ, n=100	СНТ, n=65	АО		
			I, n=11	II, n=6	III, n=3
300	196,9 \pm 38,7	208,7 \pm 12,6	114,3\pm14,4*	88,8\pm14,3	49,7\pm1,5
500	170,8 \pm 30,1	168,0 \pm 21,2	135,8 \pm 17,0	83,0\pm11,5	63,7\pm4,5
800	167,9 \pm 26,3	180,5 \pm 24,0	127,0 \pm 16,0	81,7\pm18,4	54,7\pm2,9
1000	172,8 \pm 24,9	175,1 \pm 21,5	127,0 \pm 16,0	91,3\pm12,9	54,0\pm6,2
1200	170,4 \pm 27,6	177,1 \pm 17,3	119,9 \pm 16,6	97,2\pm13,3	54,3\pm1,2
1500	173,6 \pm 26,4	175,1 \pm 218	120,9 \pm 18,2	80,2\pm11,1	62,0\pm2,0
1800	160,7 \pm 28,0	138,0 \pm 27,2	120,9 \pm 18,2	85,2\pm13,7	42,0\pm4,4
2000	151,4 \pm 23,6	152,7 \pm 23,4	79,8\pm15,8	74,2\pm12,6	38,3\pm7,4
2200	147,7 \pm 21,1	144,2 \pm 15,3	80,5\pm15,8	60,0\pm11,1	35,3\pm9,5
2500	125,6 \pm 15,7	109,8 \pm 12,4	73,3\pm17,1	51,3\pm4,7	35,7\pm4,7
2800	96,9 \pm 24,9	107,8 \pm 11,7	70,3 \pm 16,0	46,5 \pm 7,2	29,7\pm4,9
3000	97,9 \pm 33,5	93,3 \pm 12,6	64,5 \pm 17,6	39,7 \pm 6,8	28,0 \pm 4,4
3200	92,9 \pm 30,0	79,5 \pm 13,1	44,0 \pm 15,1	35,2 \pm 7,5	30,3 \pm 2,5
3500	81,5 \pm 23,9	73,5 \pm 10,8	37,2 \pm 18,4	33,0 \pm 7,0	21,0 \pm 4,0
3800	78,8 \pm 39,6	67,9 \pm 13,1	29,8 \pm 14,0	28,0 \pm 7,1	25,0 \pm 3,5
4000	71,9 \pm 44,8	64,8 \pm 7,0	34,0 \pm 12,2	25,0 \pm 4,7	22,7 \pm 4,0

*жирным шрифтом отмечены статистически достоверные отличия от ОЗЛ.

У больных с ОСО имеются значительное снижение колебательной способности подвижных структур среднего уха при остром гнойном среднем отите, а также практическое отсутствие пиков резонансных частот среднего уха. Статистически достоверные изменения от ОЗЛ обнаружены на частотах 800–2500 Гц. При этом снижение амплитуды колебаний происходит практически на всех частотах звукового спектра, больше всего – в зоне низких и средних частот. При исследовании зависимости роста амплитуды смещения БП в области *umbo* от роста УЗД выявлено также статистически достоверное снижение амплитуды колебаний до 70 дБ.

У больных, страдающих ХГСО, при исследовании лазерным автодинным методом амплитуд смещения БП в области *umbo* обнаружены довольно значительные флюктуации этого параметра (*рис. 5*), благодаря чему нами выделено в группе больных ХГСО 3 подгруппы: I – с уменьшением амплитуды смещения области *umbo*, II – с увеличением амплитуды смещения области *umbo* и III – без значительных изменений этого параметра относительно ОЗЛ. Больные, попавшие в III группу, имели незначительный размер перфорации БП – до 1–2 мм в диаметре, при этом наблюдается нормальная АЧХ, либо незначительное повышение амплитуды колебаний БП на низких частотах, незначимое статистически. Амплитуда смещения области *umbo* при росте УЗД носит характер, не отличимый от такового у ОЗЛ. Перфорации большего размера приводили к появлению статистически значимого уменьшения амплитуды смещения БП ниже 800 Гц. Подобные результаты хорошо согласуются с индивидуальными аудиограммами больных, костно-воздушный интервал в этих случаях наиболее выражен в диапазоне низких частот.

У ряда обследованных пациентов при наличии значительных перфораций (30–50% площади БП) с сохранением области *umbo* отмечается значительное повышение амплитуды смещения остатков БП, в основном на низких частотах (500–1000 Гц), до 312 нм. По всему интервалу УЗД на частоте 1000 Гц амплитуды смещения выше, чем у ОЗЛ. В данном случае отсутствует какая либо корреляция с данными тональной пороговой аудиометрии. Это можно объяснить тем, что при нарушении анатомической целостности БП амплитуда колебания ее свободных краев значительно увеличивается, а наличие кондуктивной тугоухости у данных пациентов в основном определяется в таком случае не столько перфорацией БП, сколько отсутствием градиента давления при действии звуковой волны; очевидно также повреждение цепи слуховых косточек, с ее разобщением. В таком слу-

чае поведение БП объясняется с точки зрения теории колебаний ненагруженной круглой мембраны, имеющей свободный край; также результаты имеют определенное сходство с модельными экспериментами по исследованию ненагруженной БП. Появление подобного пика, возможно, позволяет думать и о разобщении цепи слуховых косточек у данных больных, что и обуславливает изменения на аудиограмме в виде значительного костно-воздушного интервала. Различия амплитуд смещения от нормативных у ОЗЛ и костно-воздушные интервалы для каждой подгруппы больных ХГСО хорошо коррелируют в подгруппах I и II, тогда как у лиц с увеличенной амплитудой смещения БП в области *umbo* взаимосвязи ее с костно-воздушным интервалом не просматривается.

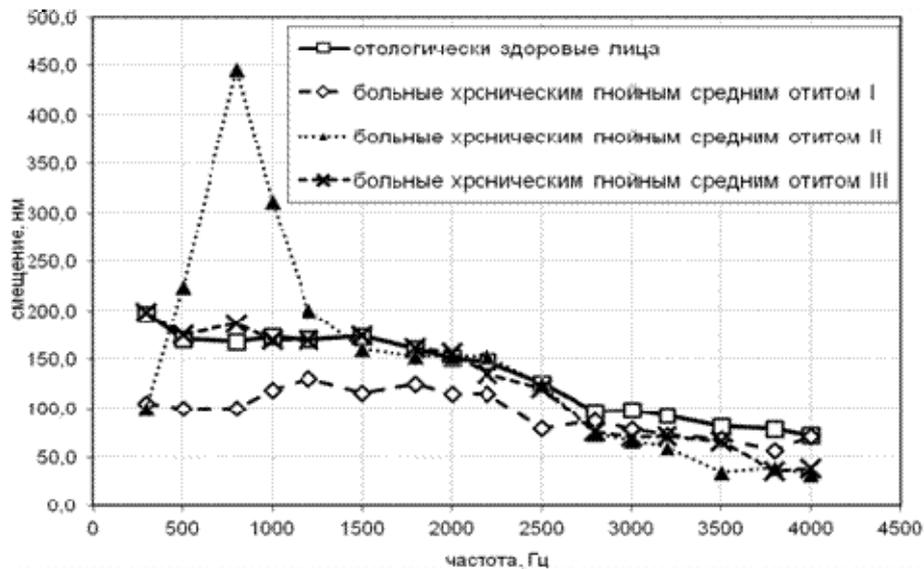


Рис. 5. Средние АЧХ БП при измерениях в области *umbo* у больных ХГСО в различных группах относительно ОЗЛ (УЗД 85 дБ): I – группа у которой обнаружено снижение амплитуды смещения БП; II – увеличение амплитуды смещения БП, появление резонансных пиков; III – без изменений.

Возможности применения измерения амплитуды смещения БП лазерным автодинным методом для дифференциальной диагностики у лиц с патологией слуха при наличии костно-воздушного интервала на аудиограмме

Исследование подвижности БП в области *umbo* является весьма ценным в плане дифференциальной диагностики патологии уха. Полученные в нашем исследовании результаты наглядно представлены на точечном графике (рис. б), при этом по оси абсцисс откладывается значение костно-воздушного интервала, зафиксированного у обследуемого на аудиограмме на

частоте 1000 Гц; по оси ординат – разница между средней амплитудой смещения БП в области *umbo* у ОЗЛ и измеренной амплитудой смещения БП у обследованного на частоте 1000 Гц, УЗД 85 дБ. Возникновение костно-воздушного интервала до 10 дБ обычно не считается значимым; стандартное отклонение от среднего значения амплитуды смещения в области *umbo* у ОЗЛ составляет $\pm 24,9$ нм; таким образом, на графике разграничена область нормальных значений. В эту область попадут также и больные СНТ, так как в этом случае на аудиограммах не имеется костно-воздушного интервала; амплитуда смещения БП в области *umbo* практически не отличается от ОЗЛ.

При рассмотрении нескольких подгрупп больных с ХГСО можно отметить, что подгруппа II (с большими перфорациями и большой амплитудой смещения БП) попадает в область на графике, близкую к подтвержденному оперативным путем случаю с разъединением цепи слуховых косточек. Очевидно, кроме наличия перфорации в этих случаях имеется разрушение цепи слуховых косточек.

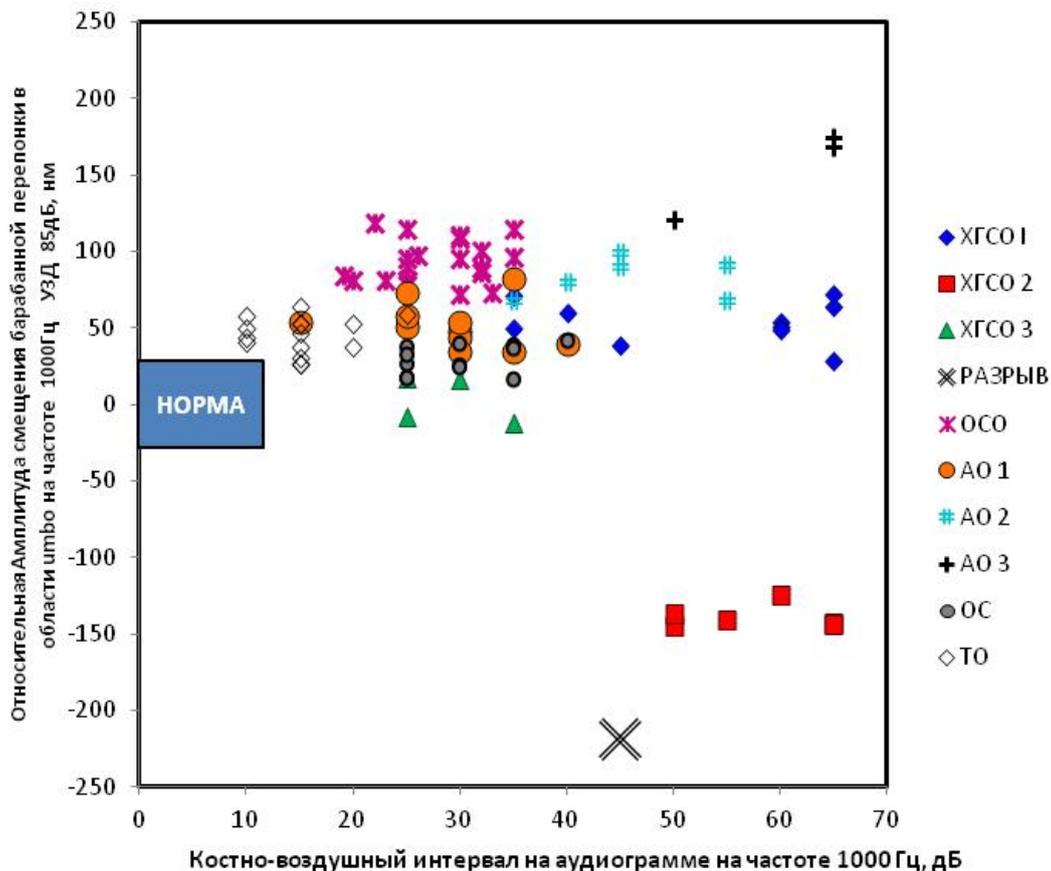


Рис. 6. Графическое изображение основных групп полученных нами данных в представлении костно-воздушный интервал/относительная амплитуда смещения области *umbo* БП. Измерения смещения даны для частоты 1000 Гц, УЗД 85 дБ, костно-воздушный интервал в полосе 1000 Гц.

Больные ХГСО со значительной тугоухостью, но уменьшенной амплитудой смещения БП (I подгруппа) попадают в противоположную подгруппе II область, близко к группе АО с выраженными нарушениями слуха. Таким образом, у этих больных имеются процессы в барабанной полости, препятствующие нормальному движению ее структур (холестеатома, рубцовые изменения, полипы в барабанной полости). Больные с малыми точечными перфорациями БП (III подгруппа) и небольшим снижением слуха по кондуктивному типу примыкают к ОЗЛ.

Больные с ОСО образуют достаточно обособленную группу. Наличие экссудата в барабанной полости резко снижает смещения БП, группа находится достаточно высоко в положительной части графика. В достаточной степени отличаются между собой и подгруппы больных АО, выделенные по степени потери слуха. Больные с ОС ввиду незначительного изменения подвижности БП из-за избирательной фиксации стремени и хорошей подвижности прочих структур среднего уха занимают положение около нулевой точки по оси ординат, примыкая к ОЗЛ.

На основании изложенных данных следует сделать вывод о возможности применения методики лазерного автодинного метода измерения смещения БП для дифференциальной диагностики различной патологии уха при наличии костно-воздушного интервала. Каждому процессу на данном графике четко соответствует определенная область. Так, при нанесении данных обследования смещения БП лазерным автодинным методом в области *umbo* на подобный график можно сделать заключение о наличии у больного разъединения цепи слуховых косточек, либо адгезивных процессов или фиксации стремени, либо о наличии экссудата в полостях среднего уха.

Возможности исследования проходимости слуховой трубы лазерным автодинным методом

Нами впервые предложен способ определения проходимости слуховой трубы с применением лазерного автодина. В основе способа лежит регистрация колебаний БП на фоне подачи зондирующего тона в наружный слуховой проход и их изменение при изменении давления в барабанной полости при открытии слуховой трубы (спонтанно или при выполнении проб).

Способ определения проходимости слуховой трубы предлагаемым методом заключается в следующем. На фоне подачи зондирующего звукового сигнала (1000–1500 Гц, 85дБ) в реальном времени регистрируется автодин-

ный сигнал, на спектрограмме которого отражаются пики основного тона и кратных основному тону гармоник (исходя из предположения гармонических колебаний БП). Затем больной выполняет простой глоток. При этом при проходимой слуховой трубе спектральная картина, регистрируемая на экране в реальном времени, резко изменится – на определенное время перестают регистрироваться четко видимые пики основного тона и гармоник на спектрограмме автодинного сигнала. На некоторое время под влиянием негармонического колебания БП, происходящего вследствие изменения давления в барабанной полости при проходимой слуховой трубе. При этом наблюдаемая в реальном режиме времени спектрограмма автодинного сигнала приобретает хаотичный вид, что трактуется как положительный результат опыта (т.е. слуховая труба проходима).

Положительный результат опыта с простым глотком свидетельствует о I степени проходимости слуховой трубы; положительный результат, получаемый лишь при выполнении больным во время исследования пробы Тойнби – о II степени; получение положительного результата лишь при выполнении при измерениях больным пробы Вальсальвы или при продувании по Политцеру свидетельствует о III степени проходимости слуховой трубы. Отсутствие изменений спектральной картины автодинного сигнала при подаче зондирующего сигнала и выполнении всех трех указанных проб дает возможность сделать вывод о тотальной непроходимости слуховой трубы.

Измерение амплитуды смещения БП в нескольких точках и математическое моделирование БП для визуализации полученных данных

При помощи предложенного нами крепления лазерного автодина на операционный микроскоп возможно его наведение на различные участки БП. Результаты, полученные таким образом, хорошо соотносятся с измерениями, проведенными нами ранее на большом количестве обследуемых ОЗЛ с измерением в области центрального отдела БП, проводимого при помощи лазерного автодина, укрепляемого на голове обследуемого, но при этом увеличение и более жесткое крепление системы с возможностью ее наведения в определенные участки позволяет составить более подробную карту амплитуд движений БП в различных ее участках. Однако подобные исследования требуют визуального представления для врача и исследователя, для чего нами была создана трехмерная модель БП.

Для визуального отражения результатов измерения нами была построена модель в системе трехмерного моделирования Autodesk 3D Studio MAX 2012. Смоделирована изотропная БП эллиптической формы, содержащая 15 элементов на диаметр (всего 812 элементов), в виде одного слоя элементов, как линейная эластическая структура с гомогенными свойствами материала. Модуль Юнга задан 20 МПа для круговых связей и 32 МПа для радиальных связей элементов *pars tensa*; для *pars flaccida* модуль Юнга 10 МПа для круговых связей и 10 МПа для радиальных (Prendergast P.J. et al., 1999). Плотность элементов задана 1200 кг/м³ (Williams K.R. et al., 1990). Края модели жестко закреплены. Рукоятка молоточка выполнена изотропной, с модулем Юнга 14.1 ГПа (Speirs A.D. et al., 1999), фактически в виде твердого элемента; плотность его принята 2550 кг/м³ (Kirikae I. et al., 1960). Демпфирующий параметр принят нами в виде $\alpha=0 \text{ с}^{-1}$, $\beta=0,0001 \text{ с}$. Рукоятка молоточка выполнена с опорой на точку вращения в области главной оси ротации слуховых косточек (линия, проходящая от передней молоточковой складки к задней наковаленной связке – по О.В. Стратиевой, 2004). Имитация головки молоточка далее нагружена на упругий элемент (пружину), имитирующий остальные структуры среднего и внутреннего уха, которая закреплена на дистальном конце. В нашем варианте отсутствует градиент давления по разные стороны поверхности модели. В наше исследование не входит исследование непосредственно подвижности стремени или других структур среднего уха, мы рассматриваем механику среднего уха через измеренную нами амплитуду смещения БП, поэтому такая условная замена сложной нагруженной системы среднего и внутреннего уха допустима. Данные о фазах движения и региональных модах БП при звуковой стимуляции взяты нами из описания модельных опытов в литературе (Khanna S.M., Thonndorf J., 1962; Wada H. et al., 2002).

Измерения (табл. 2) были проведены нами на ОЗЛ (5 человек) и больных с АО (2 чел.). Измерения колебаний нами проводились в 4 точках на БП, использовались частоты 1000 Гц, с последующим наложением полученных данных на трехмерную модель. В наших исследованиях на примере данной модели наглядно отражается изменение динамики амплитуды смещения БП при АО с различной степенью потери слуха, что может быть использовано в практической деятельности при конструировании соответствующих диагностических приборов.

Значения амплитуды смещения БП (нм), измеренные в различных ее точках при звуковой стимуляции 1000 Гц, УЗД 85 дБ

Область исследования амплитуды смещения барабанной перепонки	ОЗЛ	Больной АО I	Больной АО II
Область <i>umbo</i>	156	75	45
Задневерхний квадрант	280	203	47
Задненижний квадрант	325	250	112
Передненижний квадрант	255	177	131

Регистрация АР при помощи лазерного автодинного метода измерения смещения БП

Возможность регистрации АР при помощи прямых методов измерения подвижности структур среднего уха дискутировалась в работах А.М. Huber (2001), J.J. Rosowski (2002). Для проверки возможности регистрации АР при помощи лазерного автодинного метода измерения смещения БП нами была создана установка, состоящая из: шумомера; источника звукового сигнала – громкоговорителя с генератором звуковых частот, использованного нами для исследований в свободном звуковом поле; лазерного автодинного измерителя, смонтированного на операционном микроскопе. Измерения смещения проводились в области *umbo*. Всего каждое исследование проведено у 5 ОЗЛ. Сигнал с автодинного измерителя записывался в режиме реального времени и подвергался затем последующей математической обработке, таким образом, на протяжении 1–2 мин. исследования получался достаточно репрезентативный объем выборки автодинного сигнала. С целью регистрации ипсилатерального рефлекса обследуемому в исследуемое ухо в свободном звуковом поле при тщательном контроле создаваемого УЗД подавался зондирующий тон, частотой 220 Гц с УЗД 65 дБ. Контрлатеральное ухо при этом заглушалось. Регулировкой лазерного автодинного измерителя добивались регистрации стационарной картины спектра автодинного сигнала, записывали его и в нескольких выборках производили измерение амплитуды смещения БП в области *umbo*. Затем через тот же громкоговоритель подавалась от генератора сигнала другая частота – 1000 Гц (стимулирующий тон) с созданием УЗД 85 дБ в наружном слуховом проходе; калибровался ее уро-

вень на генераторе для достижения необходимой интенсивности. Затем на фоне подачи зондирующего тона 220 Гц с УЗД 65 дБ и непрерывной записи автодинного сигнала включалась также подача стимулирующего тона 1000 Гц с калиброванной заранее интенсивностью. Во всех сериях записанного автодинного сигнала зарегистрировано уменьшение амплитуды смещения БП на частоте зондирующего тона на $6,07 \pm 0,21$ нм. Регистрация указанных изменений амплитуды смещения на частоте зондирующего тона является в таком случае действием АР, вызванного при подаче в ухо дополнительного количества звуковой энергии.

Для подачи в контрлатеральное ухо стимулирующего сигнала нами был использован аудиометр «Interacoustics» МА-35 (Дания) и его воздушный телефон. В исследуемое ухо для возбуждения колебаний БП и регистрации автодинного сигнала подавали зондирующий тон с УЗД 65 дБ, при этом непрерывно вели запись автодинного сигнала. Затем с аудиометра подавался стимулирующий сигнал – чистый тон 1000 Гц с УЗД 85 дБ в противоположное ухо. При обработке данных нами отмечалось, что при подаче стимулирующего тона появлялись изменения в виде изменения амплитуды колебания зондирующего тона. Зарегистрировано во всех сериях записанного автодинного сигнала уменьшение амплитуды смещения БП на частоте зондирующего тона на $4,70 \pm 0,86$ нм.

Таким образом, можно сделать вывод, что влияние рефлекса среднего уха на колебания БП достаточно мало, однако оно может быть зарегистрировано с помощью лазерного автодина. Возможность регистрации АР подобным методом должна послужить в будущем к созданию новой скрининговой методики и аппаратуры, утилизирующей этот метод для использования в целях ранней диагностики врожденной тугоухости.

* * * * *

Лазерный автодинный измеритель смещения БП является ценным новым диагностическим инструментом, значение которого в исследованиях фундаментальных вопросов физиологии среднего уха, а также в дифференциальной диагностике патологии слуха нельзя недооценивать. Практически любая патология среднего уха отражается на амплитуде смещения БП; использование лазерного автодинного метода регистрации смещения БП при наличии костно-воздушного интервала на аудиограмме позволяет четко дать

характеристику патологическим изменениям проводящей системы среднего уха. Метод дает возможность объективной регистрации проходимости слуховой трубы, а также открывает возможности к построению принципиально новой объективной методики диагностики слуха, основанной на регистрации АР при помощи автодинного эффекта в полупроводниковых лазерах.

Выводы

1. Предложенный нами аппаратно-программный комплекс лазерного автодинного измерителя наносмещений может использоваться для измерения амплитуды смещения различных отделов БП при звуковой стимуляции чистыми синусоидальными тонами, как в модельных опытах, так и в широкой клинической практике для диагностики заболеваний уха согласно разработанной нами методики его применения.

2. При исследовании колебаний модели БП с помощью лазерного автодинного измерителя наносмещений отмечается хорошая повторяемость и воспроизводимость эксперимента; поведение модели БП соответствует теории колебания свободной упругой мембраны с формированием различных вибрационных портретов в зависимости от частоты колебаний и УЗД.

3. В модельных опытах на височных костях установлено, что диагностика патологических состояний среднего уха возможна по измерениям амплитуды смещения БП. При имитации адгезивных процессов в барабанной полости зафиксировано снижение амплитуды смещения БП; при разрыве цепи слуховых косточек колебания БП приобретают характер колебаний упругой ненагруженной мембраны.

4. Движения БП как анизотропной упругой эллиптической мембраны, нагруженной на структуры среднего и внутреннего уха, носят сложный характер. Смещение БП имеет различную величину в различных отделах – наибольшее наблюдается в задненижнем квадранте, меньшее – в области *umbo*. Смещение БП в области *umbo* у ОЗЛ, измеренное при звуковой стимуляции чистыми синусоидальными тонами при создании УЗД 85 дБ в наружном слуховом проходе, составляет на частоте стимулирующего тона 300 Гц $196,9 \pm 38,7$ нм; 500 Гц $170,8 \pm 30,1$ нм; 1000 Гц $172,8 \pm 24,9$ нм; 1500 Гц $173,6 \pm 26,4$ нм; 2000 Гц $151,4 \pm 23,6$ нм; 3000 Гц $97,9 \pm 35,5$ нм; 4000 Гц $97,9 \pm 30,0$ нм; таким образом, АЧХ БП достаточно ровная с падением на частотах свыше 2000 Гц крутизной 3дБ/окт при УЗД 85 дБ. У ОЗЛ зависимость амплитуды смещения БП от нарастания УЗД в наружном слуховом проходе в

пределах от 25 до 85 дБ носит логарифмический характер на частотах 500Гц, 1000Гц, 2000Гц, 4000 Гц. Амплитуда смещения БП ОЗЛ достоверно не отличается в возрастных группах от 15 до 75 лет.

5. У больных СНТ амплитуда смещения БП статистически достоверно не отличается от ОЗЛ.

6. У больных АО смещение БП статистически достоверно меньше, чем у ОЗЛ; при этом величина изменения амплитуды смещения БП относительно ОЗЛ имеет сильную корреляционную зависимость от потери слуха и величины костно-воздушного интервала на соответствующих частотах. У больных ОС смещение БП статистически достоверно не отличается от ОЗЛ. У больных ХГСО смещение БП в различных ее отделах отличается большим разнообразием: наряду с небольшими смещениями возможны колебания значительной амплитуды. У больных с разрывом цепи слуховых косточек амплитуда смещения БП выше, чем у ОЗЛ, АЧХ приобретает ярко выраженные резонансные частоты. Возможно использование предложенного графического изображения результатов в системе координат костно-воздушный интервал на частоте 1000 Гц/величина изменения амплитуды смещения БП у обследуемого относительно ОЗЛ на частоте 1000 Гц с УЗД 85 дБ для дифференциальной диагностики тугоухости.

7. Создана изотропная модель БП, построенная методом конечных элементов, связанная с неупругой рукояткой молоточка, имеющего ось вращения, и нагруженная на имитацию структур среднего и внутреннего уха при помощи упругого элемента, которая может быть использована для симуляции движений БП и ее визуализации в контрольно-измерительных системах.

8. Лазерный автодинный метод измерения смещения БП может быть использован для объективной оценки проходимости слуховой трубы, при этом основным дифференциально-диагностическим критерием ее проходимости служит изменение спектральной картины регистрируемого в реальном времени сигнала лазерного автодина при выполнении различных проб на фоне подачи низкочастотного зондирующего тона.

9. Измерение смещения БП с помощью лазерного автодинного метода позволяет зарегистрировать появление АР при звуковой стимуляции с использованием двух тонов с некротной частотой – низкочастотного зондирующего тона и высокочастотного стимулирующего тона; при этом исследование может быть выполнено как ипсилатерально, так и контрлатерально.

Практические рекомендации

1. Измерение смещения БП лазерным автодинным методом рекомендуется для использования в клинической практике для дифференциальной диагностики патологии уха.

2. При разработке лазерных автодинных измерителей смещения БП рекомендуется использование лазерных диодов на квантоворазмерных структурах с дифракционно-ограниченной одиночной пространственной модой с мощностью излучения 5 мВт и длиной волны 652 нм. При конструировании подобных приборов следует также учитывать специфику их применения в клинической практике и снабжать их устройствами фиксации (на голову обследуемого или на операционный микроскоп); а также устройствами для фокусировки (автофокусировки) на объект исследования.

3. Для интерпретации результатов исследования смещения БП лазерным автодинным методом в клинической практике рекомендуется использование их графического отображения в системе координат костно-воздушный интервал на частоте 1000 Гц/величина изменения амплитуды смещения БП у обследуемого относительно ОЗЛ на частоте 1000 Гц с УЗД 85 дБ с выделенными на графике дифференциально-диагностическими областями, соответствующими различной патологии среднего уха.

4. Для визуализации результатов исследования амплитуды смещения БП в контрольно-измерительных системах, использующих автодинный метод регистрации смещения БП, рекомендуется применять трехмерную изотропную модель БП, построенную методом конечных элементов, связанную с неупругой рукояткой молоточка, имеющего ось вращения, и нагруженной на имитацию структур среднего и внутреннего уха при помощи упругого элемента.

5. Для объективизации функции слуховой трубы необходимо применять исследование смещения БП лазерным автодинным методом с регистрацией спектральной картины сигнала автодина в реальном времени.

6. В разрабатываемую промышленную аппаратуру для объективного исследования слуховой функции у детей раннего возраста необходимо включать лазерный автодинный измеритель для регистрации АР с последующим формированием специальных скрининговых программ.

Список научных работ, опубликованных по теме диссертации

1. Усанов Д.А., Мареев О.В., Скрипаль А.В., Камышанский А.С., Мареев Г.О., Баженов В.А. Лазерная диагностика амплитуды колебаний барабанной перепонки // В сб.: «Медицинская физика – 2005. Материалы II Евразийского конгресса по медицинской физике и инженерии». – Москва. – 2005 г. – С. 376–377.
2. Усанов Д.А., Мареев О.В., Скрипаль А.В., Камышанский А.С., Мареев Г.О. Исследование подвижности барабанной перепонки лазерным автодинным методом // Современные аспекты и перспективы развития оториноларингологии: материалы юбилейной Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. – Москва. – 2005 г. – С. 150.
3. Усанов Д.А., Мареев О.В., Скрипаль А.В., Камышанский А.С., Мареев Г.О. Измерение амплитуды колебаний барабанной перепонки при помощи лазерного автодинного измерителя // в сб.: Материалы VII съезда оториноларингологов России. – Н. Новгород. – 2006. – С. 123–124.
4. Усанов Д.А., Мареев О.В., Скрипаль А.В., Камышанский А.С., Мареев Г.О., Баженов В.А. Использование лазерного автодинного метода для измерения колебаний барабанной перепонки // Мат. 67-й научно-практ. конф. студентов и молодых специалистов СГМУ «Молодые ученые – здравоохранению региона». – Саратов, 2006. – С. 64.
5. Усанов Д.А., Мареев О.В., Скрипаль А.В., Мареев Г.О. Лазерный автодинный измеритель амплитуды колебаний барабанной перепонки // Второй Саратовский салон изобретений, инноваций и инвестиций. – Саратов, изд-во СГУ. – 2006. – Ч. 1. – С. 32–33.
6. Мареев Г.О., Ветрова О.М., Авдеев К.С. Использование лазерного автодина для измерения смещения барабанной перепонки человека *in vivo* и *in vitro* // Мат. 68-й научно-практ. конф. студентов и молодых специалистов СГМУ «Молодые ученые – здравоохранению региона». – Саратов, 2007. – С. 178.
7. **Усанов Д.А., Мареев О.В., Скрипаль А.В., Камышанский А.С., Мареев Г.О. Бифуркация удвоения периода колебаний барабанной перепонки при увеличении звукового давления // Письма в ЖТФ. – Т. 33. – Вып. 21. – 2007. – С. 90–94. (ВАК) [англ. перев.: Usanov D. A., Mareev O. V., Skripal A. V., Mareev G. O., Kamyshanskiĭ A. S. Acoustic pressure induced period-doubling bifurcations in tympanic membrane oscillations // Technical Physics Letters. – 2007. – Vol .33 – №11. – P. 939–940.]**

8. Мареев О.В., Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Авдеев К.С., Мареев Г.О. Измерение смещения барабанной перепонки лазерным автодинным методом // Российская оториноларингология. – Прил. №2. – 2008. – С. 285 – 290.
9. Мареев О.В., Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Мареев Г.О. Лазерный автодинный измеритель смещения барабанной перепонки // в сб.: «I Саратовская ярмарка медицинских технологий». – СГМУ. – 2008. – С. 18.
10. Мареев О.В., Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Мареев Г.О. Использование в диагностике заболеваний среднего уха метода лазерного автодинного измерения смещения барабанной перепонки // в сб.: «Докторантские чтения». – СГМУ. – 2008. – С. 156–162.
11. Мареев Г.О., Тореева О.Г. Результаты измерения подвижности барабанной перепонки у отитатрических больных // Материалы 69 конференции студентов и молодых специалистов «Молодые ученые – здравоохранению региона» СГМУ. – Саратов. – 2008. – С. 11.
12. Мареев О.В., Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Мареев Г.О., Авдеев К.С. Измерение подвижности барабанной перепонки лазерным автодинным методом // В сб.: Материалы X Международной научной конференции «Здоровье семьи – XXI век». – Израиль, 2008.– С. 365.
13. Мареев О.В., Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Мареев Г.О., Авдеев К.С. К вопросу об измерении подвижности барабанной перепонки // в сб.: Естествознание и гуманизм. – Т. 5. – №1. – 2008 г. – С. 76.
14. **Мареев О.В., Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Мареев Г.О. Результаты использования метода лазерного автодинного измерения смещения барабанной перепонки в дифференциальной диагностике патологии среднего уха // Медицинский альманах. – 2008. – №3. – С. 49–51. (ВАК)**
15. **Мареев О.В., Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Мареев Г.О., Авдеев К.С. Определение подвижности барабанной перепонки по спектру автодинного сигнала полупроводникового лазера // Альманах клинической медицины. – 2008. – № 17(2). – С. 358–361. (ВАК)**
16. Усанов Д.А., Мареев О.В., Скрипаль А.В., Мареев Г.О., Авдеев К.С. Измерение характеристик движения барабанной перепонки лазерным автодинным методом // В сб. «Методы компьютерной диагностики в биологии и медицине». – Материалы Ежегодной Всероссийской научной школы-семинара 3–5 июля 2008 г. – Саратов, изд-во СГУ. – 2008. – С. 11–15.
17. Мареев Г.О., Мареев О.В., Луцевич С.И., Жигалов В.А., Рогова Е.Г. Измерение подвижности барабанной перепонки в разных отделах // В сб. «Современный мир, природа и человек». – 2009. – Т. 1, №2. – С. 10–11.

18. Мареев О.В., Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Мареев Г.О., Луцевич С.И. Исследование колебаний барабанной перепонки в норме и при патологии среднего уха // В сб. «Социальные проблемы медицины и экологии человека» – материалы всероссийской научно-практической конференции. – Саратов, изд. СГМУ, 2009. – С. 330–333.
19. Мареев О. В., Мареев Г. О., Усанов Д. А., Скрипаль А. В. Измерение подвижности барабанной перепонки в различных отделах // Российская оториноларингология. – 2009. – прил. №1. – С. 246–248.
- 20. Мареев О. В., Мареев Г. О., Усанов Д. А., Скрипаль А. В., Авдеев К. С. Автодинный измеритель колебаний барабанной перепонки // Российская оториноларингология. – 2009. – №2. – С. 119 – 125. (ВАК)**
21. Мареев Г.О. Мареев О. В., Усанов Д. А., Скрипаль А. В. Использование измерения подвижности барабанной перепонки в диагностических целях // В сб. «Биомеханика-2010». – Тезисы докладов X Всероссийской конференции. – Саратов, изд-во СГУ., 2010. – С. 89–90.
22. Мареев О.В. Клиническое значение измерения подвижности барабанной перепонки // Фундаментальные исследования практической и экспериментальной оториноларингологии. Мат. Научно-практической конференции врачей-оториноларингологов с международным участием. – Самара, 2010. – С.32.
23. Мареев Г.О., Мареев О.В. Устройство для крепления приборов на операционный микроскоп // V Саратовский салон изобретений, инноваций и инвестиций. – Саратов, 2010. – С. 104
24. Мареев Г.О., Лоцманов Ю.Ф. Исследование подвижности барабанной перепонки в норме и при различной патологии уха // Мат. 72-й научно-практ. конф. студентов и молодых специалистов СГМУ «Молодые ученые – здравоохранению региона». – Саратов, 2011. – С. 365–366.
25. Мареев О.В., Мареев Г.О. Значение исследования подвижности барабанной перепонки лазерным автодинным методом при различной патологии уха // в сб.: Вопросы теоретической и практической медицины, 9-ая научно-практическая конференция врачей Карачаево-Черкесской республики. – Черкесск, 2011. – С. 162–164.
- 26. Дайхес Н.А., Мареев О.В., Мареев Г.О., Усанов Д.А., Скрипаль А.В. Результаты применения лазерного автодина для исследования подвижности барабанной перепонки // Саратовский научно-медицинский журнал. – 2011. – Т.7, №4. – С. 894–897. (ВАК)**

27. Мареев Г.О., Скрипаль А.В., Усанов Д.А. Использование автодинного эффекта в полупроводниковых лазерах для регистрации наносмещений биологических объектов // Научно-технический вестник Поволжья. – 2012. – №1. – С. 31–38. (ВАК)
28. Мареев Г.О. Подвижность барабанной перепонки в норме и при различной патологии уха // В сб.: «Аспирантские и докторантские чтения». Материалы научно-практической конференции молодых ученых в рамках первой Всероссийской недели науки с международным участием. – Саратов: СГМУ. – 2012. – С.72–73.
29. Мареев Г.О. Подвижность барабанной перепонки в различных отделах в норме и при адгезивных процессах в барабанной полости // Современные проблемы науки и образования. – 2012. – №2; URL: www.science-education.ru/102-5727 (дата обращения: 18.03.2012). (ВАК)
30. Мареев О.В., Мареев Г.О., Усанов Д.А., Скрипаль А.В. Исследование подвижности барабанной перепонки лазерным автодинным методом у отолотически нормальных лиц и при различной патологии уха // Практическая медицина. – 2012. – №1(56). – С. 116–119. (ВАК)
31. Мареев Г.О. Лазерная автодинная установка для измерения подвижности барабанной перепонки // Перспективы науки. – 2012. – №2(29). – С. 25–30. (ВАК)
32. Мареев Г.О. Современные представления о среднем ухе и его математические модели // Саратовский научно-медицинский журнал. – 2012. – Т. 8, №1. – С. 96–101. (ВАК)
33. Мареев Г.О., Мареев О.В. Диапазон смещений барабанной перепонки в норме и при различной патологии уха // Кубанский научный медицинский вестник. – 2012. – №1(130). – С. 114–117. (ВАК)
34. Мареев О.В., Мареев Г.О., Усанов Д.А., Скрипаль А.В. Результаты клинического исследования подвижности барабанной перепонки у отолотически нормальных лиц и при различной патологии уха // В сб: «Материалы I Петербургского Форума оториноларингологов России», СПб. – 2012. – Т. 2. – С. 186–189.
35. Мареев Г.О. Основные результаты применения лазерной автодинной установки для измерения вибрационных параметров структур среднего уха человека // Мир науки, культуры и образования. – 2012. – №2(33). – С. 516–519. (ВАК)
36. Мареев Г.О., Мареев О.В., Дайхес Н.А., Усанов Д.А., Скрипаль А.В. Результаты клинического исследования подвижности барабанной пере-

понки лазерным автодинным методом // Вестник оториноларингологии. – 2012. – №3. – С. 20–23. (ВАК)

37. Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Мареев О.В., Мареев Г.О. Диагностические возможности лазерного автодинного метода при различной патологии уха // В сб.: «Методы компьютерной диагностики в биологии и медицине. Материалы Всероссийской молодежной конференции», Саратов: СГУ. – 2012. – С. 146-149.

38. Мареев Г.О. Применение лазерного автодинного измерителя наносмещений в диагностике заболеваний уха // В сб.: «Современные биоинженерные и ядерно-физические технологии в медицине», Саратов. – 2012. – С. 83-86.

39. Усанов Д.А., Мареев О.В., Скрипаль А.В., Мареев Г.О. Лазерные автодинные измерения параметров движений барабанной перепонки // Российский журнал биомеханики. – 2012. – Т. 16, №1. – С. 8–21. (ВАК)

[англ. перев.: Usanov D.A., Mareev O.V., Skripal A.V., Mareev G.O. Laser auto-dine measurements of the parameters of the tympanic membrane motions // Russian Journal of Biomechanics. – 2012. – Vol.16. №1(55). – С. 5–17.]

40. Мареев О.В., Мареев Г.О. Измерение смещения барабанной перепонки лазерным автодинным методом в модельном опыте на височных костях домашней свиньи // Биомедицина. – 2012. – №2. – С. 22–26. (ВАК)

41. Мареев О.В., Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Мареев Г.О. Лазерный автодинный эффект и его применение в измерении колебаний барабанной перепонки // Вестник новых медицинских технологий. – 2012. – Т. XIX, №3. – С. 118-121. (ВАК)

42. Мареев Г.О. Измерение вибрационных параметров среднего уха с использованием лазерного автодинного измерителя наносмещений в норме и при различной патологии // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Медицинские науки. – 2012. - №3(23). – С. 75-80. (ВАК)

Патенты на изобретения:

1. Патент на изобретение РФ №2388406. Способ диагностики проходимости слуховой трубы / Мареев О.В., Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Мареев Г.О. // Оpubл. 10.05.2010 г.

2. Патент на полезную модель РФ №95997. Устройство для крепления на голову пациента приборов при исследованиях на ухе / Мареев О.В., Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Мареев Г.О. // Оpubл. 20.07.2010 г.
3. Патент на полезную модель РФ №88537. Устройство для крепления приборов на операционный микроскоп / Мареев О.В., Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Мареев Г.О. // Оpubл. 20.11.2009 г.

Список сокращений

- АО** – адгезивный отит
- АР** – акустический рефлекс
- АЧХ** – амплитудно-частотная характеристика
- БП** – барабанная перепонка
- ОЗЛ** – отологически здоровые лица
- ОС** – отосклероз
- ОСО** – острый средний неперфоративный отит
- СНТ** – сенсоневральная тугоухость
- ТО** – тубоотит
- УЗД** – уровень звукового давления
- ХГСО** – хронический гнойный средний отит