

УДК 616.28-008.1:616.28-072:616.284-004:616.285

## ПОДВИЖНОСТЬ БАРАБАННОЙ ПЕРЕПОНКИ В РАЗЛИЧНЫХ ОТДЕЛАХ В НОРМЕ И ПРИ АДГЕЗИВНЫХ ПРОЦЕССАХ В БАРАБАННОЙ ПОЛОСТИ

Мареев Г. О.

*ГБОУ ВПО «Саратовский государственный медицинский университет им. В. И. Разумовского» Минздрава России, Саратов, Россия (410012, Саратов, ГСП ул. Большая Казачья, 112), e-mail: jey\_trasher@mail.ru*

В работе представлены основные возможности использования автодинного эффекта, возникающего в полупроводниковых лазерах, для измерения наносмещений биологических объектов. Разработана и применена специальная установка для проведения измерений наносмещений барабанной перепонки человека при звуковой стимуляции *in vivo*. Проведены измерения смещения барабанной перепонки человека *in vivo* (50 отолитически здоровых лиц); на лицах с адгезивными процессами в барабанной полости при звуковой стимуляции в свободном звуковом поле при различных уровнях звукового давления (УЗД) в наружном слуховом проходе. Построены амплитудно-частотные вибрационные характеристики (АЧВХ) барабанной перепонки нормального уха и при патологии среднего уха. Показаны отличия амплитуды наносмещений барабанной перепонки в различных ее отделах в норме и при патологии среднего уха – значительное снижение амплитуды колебаний барабанной перепонки наблюдается при адгезивном среднем отите, несколько меньшее снижение амплитуды ее колебаний относительно приведенной характеристики здорового уха – при тубоотите.

Ключевые слова: лазерный автодин, барабанная перепонка, среднее ухо, кондуктивная тугоухость, адгезивный отит, тубоотит.

## MOBILITY OF VARIOUS PARTS OF THE TYMPANIC MEMBRANE MEASURED ON THE HEALTHY EARS AND EARS WITH ADHESIVE PROCESSES IN THE TYMPANIC CAVITY

Mareev G. O.

*Saratov State Medical University n.a. V.I. Razumovsky, Saratov, Russia (410012, Saratov, street B.Kazachya, 112), e-mail: jey\_trasher@mail.ru*

The paper presents the main features of autodyne effect arising in semiconductor lasers, to measure amplitude of nanovibrations of the biological objects. We developed and applied a special unit for the measurement amplitude of human eardrum displacement which happens by sound stimulation *in vivo*. We measured the displacement of the eardrum of human *in vivo* (50 cases with healthy ears); and in cases with adhesive processes in the tympanic cavity both with acoustic stimulation in the open field at different sound pressure levels (SPL) in the external auditory canal. We construct the amplitude-frequency vibration characteristics (AFVC) for the normal ear drum and for middle ear pathology. Amplitude differences in eardrum vibrations in its various departments in the case of the middle ear pathology revealed in our investigation. - a significant reduction in the amplitude of the tympanic membrane vibrations found in the cases of adhesive otitis media, a somewhat smaller decrease in the amplitude of the oscillations with respect to the reduced performance of healthy ear – in the cases with Eustachian tube dysfunction.

Key words: laser autodyne, the eardrum, middle ear, conductive hearing loss, adhesive otitis media, eustachian tube dysfunction.

### Введение

Заболевания среднего уха, такие как, отосклероз, адгезивный отит, экссудативный отит встречаются достаточно часто и довольно сложны в диагностическом плане; нередко возникают затруднения и при определении значимости вклада патологических изменений в среднем ухе при смешной тугоухости в общую потерю слуха, и в выборе дальнейшей

тактики лечения больного [4, 5]. Используемые в оториноларингологической практике методы исследования функции среднего уха не всегда позволяют однозначно провести дифференциальную диагностику, так как являются непрямыми аудиологическими методиками [1]. Одним из способов решения этой проблемы могла бы быть оценка подвижности цепи слуховых косточек и барабанной перепонки. Но в настоящий момент практически не имеется достоверных методов оценки смещения барабанной перепонки, пригодных для использования в широкой клинической практике. Известные исторически методики, например, исследования G. Bekesy или A. Wilska [2], являются электромеханическими методами с измерением значительных смещений с последующей аппроксимацией на область малых значений. В настоящее время подобные методики рассматриваются достаточно критически [3, 7, 10] и не применяются для измерения наносмещений. Методика использования голографической интерферометрии [9] может дать ответ на вопросы достаточно точного определения амплитуды движений барабанной перепонки при звуковой стимуляции, но в широкой клинической практике применение этой методики практически невозможно, ввиду размеров и громоздкости установки, что ограничивает ее применение *in vivo*. В последние годы в ряде работ зарубежных авторов были продемонстрированы основные возможности по измерению подвижности барабанной перепонки и структур среднего уха *in vivo* путем лазерной доплеровской виброметрии и ее дифференциально-диагностические признаки при кондуктивной тугоухости различного генеза [7, 10]. Обычно используется система из лазерного доплеровского виброметра Polytec HLV-1000 (фирмы «Polytec PI», США), укрепленного на операционном микроскопе. В этих работах измерялась подвижность барабанной перепонки в различных ее отделах при адекватной звуковой стимуляции. Однако в качестве основных результатов этих исследований предлагается оперировать не линейными характеристиками смещения барабанной перепонки, а скоростью перемещения ее различных отделов, что несколько затрудняет интерпретацию результатов.

Нами предлагается принципиально новый метод определения колебаний барабанной перепонки с использованием метода измерения наносмещений – лазерного автодина [3]. Метод обладает высокой чувствительностью, и с его помощью могут быть измерены колебания в единицы нанометров [6].

### **Цель исследования**

Использовать лазерный автодинный метод измерения наносмещений для оценки вибрационных характеристик среднего уха в различных точках барабанной перепонки при

звуковой стимуляции в свободном поле, дать оценку его применению в качестве инструмента дифференциальной диагностики заболеваний уха.

### Материалы и методы исследования

Принципиальная схема разработанной нами лазерной автодинной системы (патент РФ № 2258462) для измерения наносмещений барабанной перепонки приведена на рис. 1.

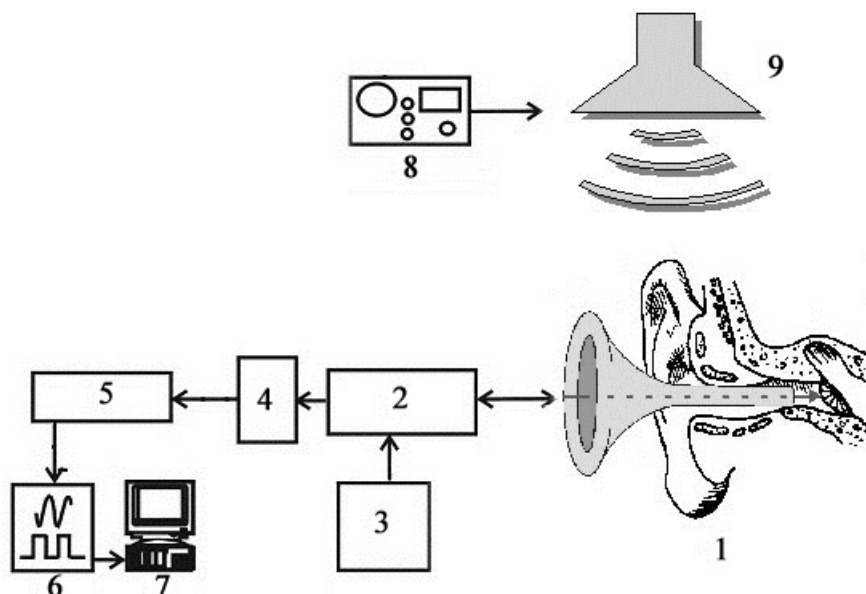


Рис. 1. Схема лазерного автодинного измерителя колебаний барабанной перепонки

В состав измерительной автодинной системы входит лазерный диод RLD-650 5 на квантоворазмерных структурах с длиной волны излучения 652 нм. На барабанную перепонку 1 направляют когерентное излучение от лазерного диода 2, питаемого от источника тока 3. Отраженное от барабанной перепонки лазерное излучение регистрируется с помощью фотоприемника 4. Сигнал с фотоприемника поступает через широкополосный усилитель, содержащий фильтр переменного сигнала 5, на вход аналого-цифрового преобразователя 6 компьютера 7. Для возбуждения колебаний барабанной перепонки используется излучатель звуковых волн 9, работающий от генератора звуковых колебаний 8. В дальнейшем проводится анализ спектра автодинного сигнала. Затем использовались два метода – для больших амплитуд амплитуда колебаний определялась по номеру гармоники с максимальной амплитудой; либо малых после разложения в ряды Фурье и Бесселя амплитуда колебаний определялась по соотношению амплитуд спектральных составляющих.

Лазерный автодинный измеритель со специальным креплением на голове обследуемого (патент РФ № 88537) описан в [3]; доказана возможность использования данного метода для оценки подвижности барабанной перепонки *in vitro* и *in vivo*. Чувствительность разработанного нами прибора – от единиц нанометров – позволяет проводить исследования на пороге слышимости для большинства частот звукового

диапазона. Измерения проводились в свободном звуковом поле. Для создания необходимого уровня звукового давления использовался калиброванный по измерителю уровня звукового давления генератор. Калибровка нами производилась по уровню звукового давления (УЗД), создаваемом в наружном слуховом проходе при помощи акустического зонда. Акустические измерения выполнены при помощи аппаратуры фирмы «Briel & Kjaer».

Для выявления основных закономерностей и результатов, получаемых при исследовании колебаний барабанной перепонки предложенным методом, нами были проведены клинические измерения в группе отологически нормальных лиц (не имеющих существенных изменений на аудиограмме, с отсутствием данных о патологии уха в анамнезе и признанные отологически здоровыми после тщательного клинического обследования), которую составили 50 человек в возрасте от 15 до 75 лет, 25 мужчин и 25 женщин. В каждом случае исследование проводилось на обоих ушах, всего обследовано 100 ушей. Исследования подвижности барабанной перепонки и вибрационных свойств интактного среднего уха проводились при помощи лазерной автодинной установки, жестко фиксируемой на голове обследуемого при помощи устройства для крепления приборов. Исследовалась амплитудно-частотная вибрационная характеристика (АЧВХ) барабанной перепонки на частотах 250–4000 Гц с УЗД 30, 55, 75, 85 дБ. Также исследовалась АЧВХ у лиц в группе больных с адгезивным средним отитом (20 человек, из них 12 женщин, 8 мужчин).

Однако описанная система с креплением на голове обследуемого позволяет лишь относительное наведение и измерение в одной точке – центре барабанной перепонки (область *umbo*). С целью модернизировать методику использования лазерного автодина, нами было предложено специальное крепление лазерного автодина на операционный микроскоп (патент РФ № 95997), позволяющее производить манипуляции по фокусировке прибора и его наведению в различные участки барабанной перепонки. С помощью этой системы были обследованы по 10 больных из группы отологически здоровых лиц, больных с адгезивным отитом и, для сравнения, 10 больных с тубоотитом.

## **Результаты**

Полученные данные исследования АЧВХ у отологически здоровых лиц приведены на рис. 2 (для УЗД 75 дБ).

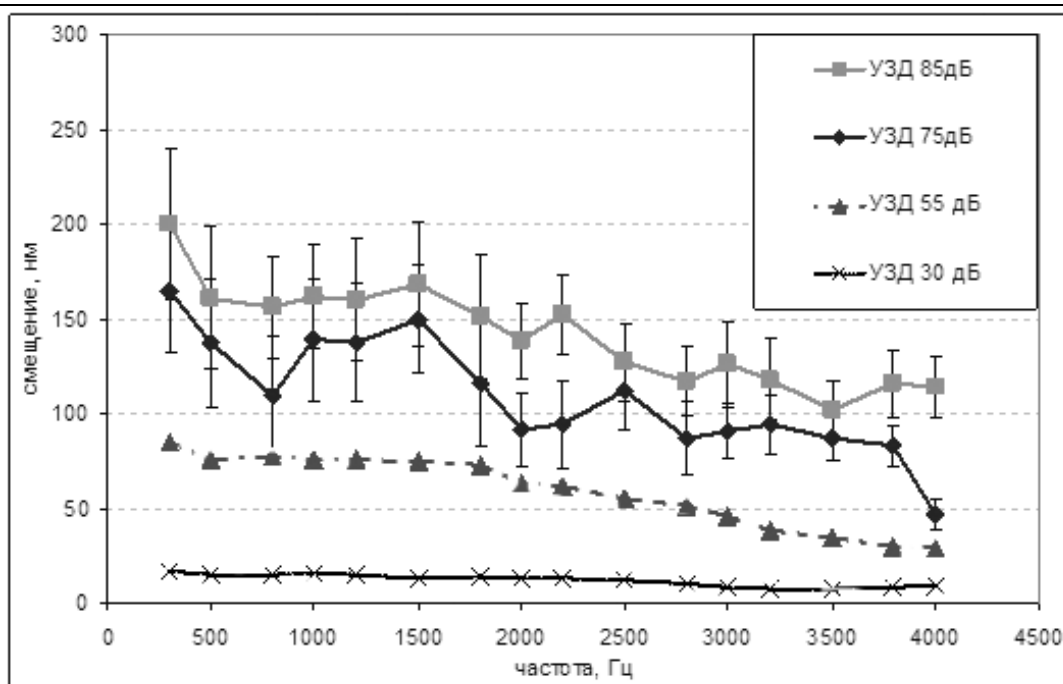


Рис. 2. Средние АЧХ интактного среднего уха человека при измерениях при различных УЗД частотном диапазоне 250–4000 Гц со стимуляцией в свободном звуковом поле

Из приведенного графика можно сделать вывод, что наибольшие колебания барабанная перепонка совершает при стимуляции низкими частотами, резонансные частоты выражены в зоне 800–1250 Гц. При исследовании характера изменения колебаний барабанной перепонки с нарастанием УЗД отмечалось, что амплитуда колебаний нарастает практически линейно на всех частотах, однако, с различной скоростью (что отражает различный угол наклона к оси абсцисс полученной зависимости на графиках).

При сравнении АЧВХ в различных возрастных группах (сформировано 3 подгруппы с возрастным интервалом 20 лет) не было обнаружено статистически значимых отличий, что свидетельствует об отсутствии возрастных изменений в микромеханике среднего уха с возрастом у отологически нормальных лиц.

В группе больных адгезивным отитом при аудиологическом обследовании тугоухость I степени отмечена у 8 обследованных, II степени – 8, III степени – 4. Нами отмечено, что у больных с адгезивным отитом отмечается выраженное уменьшение смещения барабанной перепонки, регистрируемое во всех случаях в широкой полосе частот. При этом форма кривой на графике АЧВХ смещения барабанной перепонки повторяет форму кривой воздушной проводимости на аудиограмме. Различия амплитуды смещения барабанной перепонки по сравнению с отологически нормальными лицами являются статистически значимыми (рис. 3).

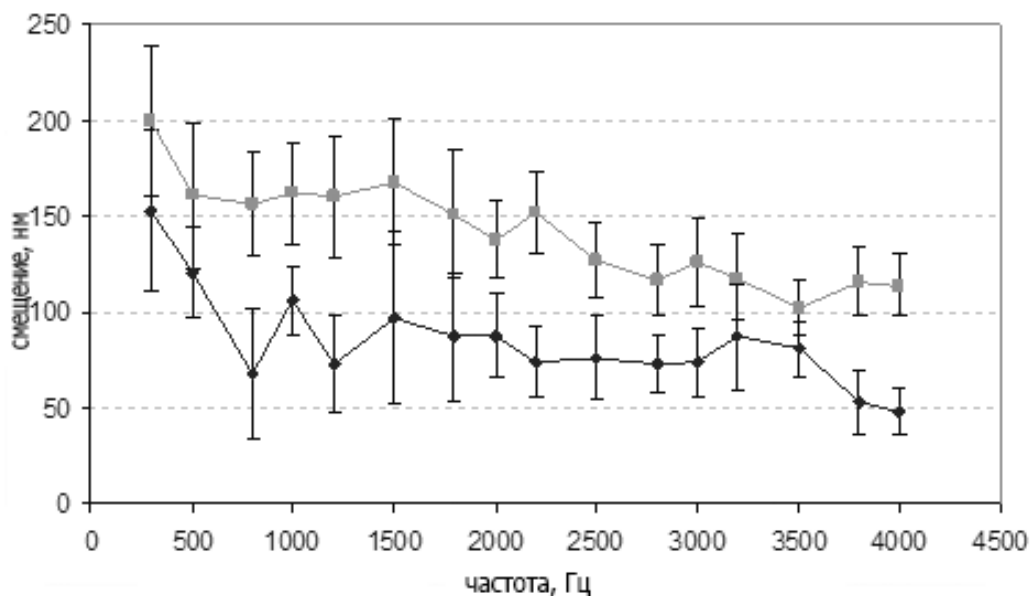


Рис. 3. Средние кривые АЧХ колебаний барабанной перепонки, измеренные нами при адгезивных процессах в среднем ухе в сравнении со средним результатом контрольной группы отологически здоровых лиц. УЗД 85 дБ

Кривая нарастания амплитуды колебания барабанной перепонки на частоте 1000 Гц заметно более пологая, чем средняя кривая нарастания амплитуды колебаний барабанной перепонки при росте УЗД в группе отологически нормальных лиц.

В ходе исследования отологически здоровых лиц при помощи установки, закрепленной на операционном микроскопе, нами были получены следующие результаты. Исследование проводилось при стимуляции акустическим сигналом 1000 Гц при уровне звукового давления в наружном слуховом проходе 90дБ, что контролировалось при помощи портативного шумомера «Bruel & Kjaer» с акустическим зондом. Подвижность барабанной перепонки в центральной части составила 156 нм, в задненижнем 250 квадранте нм, в задневерхнем квадранте 203 нм, в передненижнем квадранте 177 нм (рис. 4 а). Графики, изображенные на рис. 4., были получены наложением на трехмерную проволочную модель круглой мембраны полученных нами данных о колебаниях барабанной перепонки в различных отделах. Указанные результаты хорошо соотносятся с измерениями, проведенными нами ранее на большом количестве обследуемых отологически нормальных лиц с измерением в области центрального отдела барабанной перепонки, проводимого при помощи лазерного автодина, укрепляемого на голове обследуемого [2]. Наибольшую подвижность барабанная перепонка в норме имеет в области задненижнего квадранта.

При исследовании у больных с тубоотитом выявлено снижение подвижности центрального отдела барабанной перепонки (рис. 4 б). При исследовании у больных с

выраженным адгезивным отитом отмечается снижение подвижности барабанной перепонки не только в центральных отделах, но также и в других участках барабанной перепонки, что хорошо заметно на трехмерной модели (рис. 4, в).

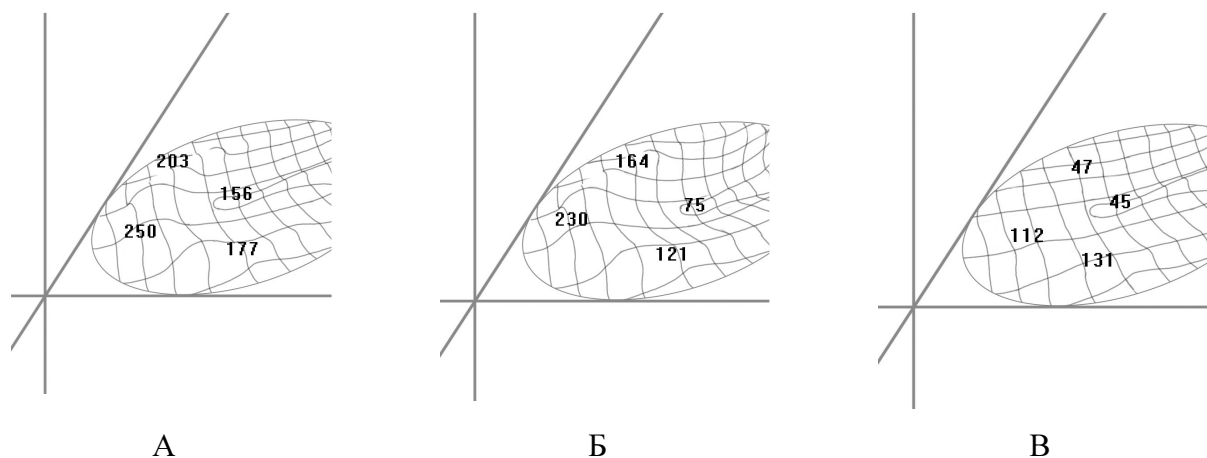


Рис. 4. Подвижность барабанной перепонки в различных точках, измеренная при помощи лазерного автодинного измерителя, показанная при наложении на трехмерную проволочную модель.

А) у отологически нормальных лиц;

Б) у больного с тубоотитом;

В) у больного с выраженным адгезивным отитом.

### Обсуждение

Полученные в результате исследования данные дополняют и уточняют известную ранее информацию о подвижности структур среднего уха. В сравнении с данными, изложенными в литературе прошлого столетия [2], отмечается значительно меньший размах колебаний барабанной перепонки, однако, полученные результаты намного превосходят данные G. Bekesy, ввиду того что последние были получены не путем прямых измерений, а при помощи аппроксимации на область малых значений данных, полученных при натуральных измерениях значительных амплитуд смещения барабанной перепонки. Наши данные в целом хорошо согласуются с современными данными, полученными с помощью лазерной доплеровской виброметрии J.J. Rosowski и S. Merchant [7]. В наших опытах отмечена несколько большая амплитуда подвижности барабанной перепонки, чем в [10], результаты исследования при патологии среднего уха сходны, хотя в целом результаты этих исследований тяжело сравнивать с нашими из-за значительной разницы использованных методик измерения. Наиболее сходными с нашими являются данные измерения *in vitro* при помощи чувствительного магнитометра [8].

### Заключение

Лазерный автодинный метод измерения наносмещений барабанной перепонки может быть применен в клинической практике для дифференциальной диагностики при адгезивных

процессах в среднем ухе и дисфункциях слуховой трубы; для точного описания состояния барабанной перепонки и структур среднего уха, что позволяет внести его в число методов объективной оценки слуховой функции и рекомендовать к внедрению в широкую клиническую практику.

### **Список литературы**

1. Альтман Я. А., Таварткиладзе Г. А. Руководство по аудиологии. – М.: ДМК Пресс, 2003. – 360 с.
2. Кобрак Г. Г. Среднее ухо: Пер. с англ. – М.: Медгиз, 1963. – 456 с.
3. Мареев О. В., Мареев Г. О., Усанов Д. А., Скрипаль А. В. Результаты использования метода лазерного автодинного измерения смещения барабанной перепонки в дифференциальной диагностике патологии среднего уха // Медицинский альманах. – №3. – 2008. – С. 49-51.
4. Пальчун В. Т., Крюков А. И. Оториноларингология: Руководство для врачей. – М.: Медицина, 2001. – 616 с.
5. Радугин К. Б., Овчинников Ю. М. Адгезивный средний отит. – М.: Медгиз, 1972. – 140 с.
6. Усанов Д. А., Скрипаль А. В., Добдин С. Ю. Определение ускорения при микро- и наносмещениях по автодинному сигналу полупроводникового лазера на квантово-размерных структурах // ПЖТФ. – 2010. – Т. 36, вып. 21. – С.78-84.
7. Rosowski J. J., Mehta R. P., Merchant S. N. Diagnostic Utility of Laser-Doppler Vibrometry in Conductive Hearing Loss with Normal Tympanic Membrane // Otol Neurotol. – 2004. – Vol. 25(3). – P. 323–332.
8. Sosa M., Carneiro A. A., Baffa O. Human ear tympanum oscillation recorded using a magnetoresistive sensor // Rev. Sci. Instrum. – 2002. – Vol. 73. – P. 3695-3695.
9. Tonndorf J., Khanna S. M. Submicroscopic displacement amplitudes of the tympanic membrane (cat) measured by a laser interferometer // J. Acoust. Soc. Am. – 1968. – Vol. 44. – P. 1546-1554.
10. Voss S. E., Rosowski J. J., Merchant S. N. Middle-ear function with tympanic-membrane perforations. II. A simple model // The Journal of the Acoustical Society of America. – 2001. – Vol. 110(3). – P. 1445-1452.

### **Рецензенты:**

Мареев О. В., д.м.н., профессор, зав. кафедрой оториноларингологии ГБОУ ВПО «Саратовский ГМУ им. В. И. Разумовского» Минздравсоцразвития России, г. Саратов.

Еремина Н. В., д.м.н., профессор кафедры оториноларингологии ГБОУ ВПО «Самарский ГМУ» Минздравсоцразвития России, г. Саратов.