

ИЗМЕРЕНИЕ ВИБРАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ СРЕДНЕГО УХА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЛАЗЕРНОГО АВТОДИННОГО ИЗМЕРИТЕЛЯ НАНОСМЕЩЕНИЙ В НОРМЕ И ПРИ РАЗЛИЧНОЙ ПАТОЛОГИИ¹

Аннотация. Исследование посвящено оценке состояния структур среднего уха при помощи современных нанотехнологических методов. Приведены результаты собственных исследований подвижности барабанной перепонки при помощи лазерного автодинного измерителя и их значение в дифференциальной диагностике заболеваний уха.

Ключевые слова: лазерный автодин, барабанная перепонка, среднее ухо, тугоухость.

Abstract. Research is devoted to assessing the state of the middle ear structures by usage of modern nanotechnology methods. The article adduces the results of custom research of the eardrum movements with a laser autodyne and their value in differential diagnosis of ear diseases.

Key words: laser autodyne, middle ear, tympanic membrane, hearing loss.

Актуальнейшей на сегодня проблемой современной оториноларингологии остается тугоухость. У части больных нарушение слуха связано с поражением звукопроводящего аппарата. Дифференциальная диагностика этой формы тугоухости зачастую затруднена; встречается и смешанная форма тугоухости, при лечении которой необходимо учитывать сравнительный вклад в потерю слуха патологии среднего и внутреннего уха.

1. Современное состояние проблемы

В последнее время большое значение приобретает также оценка состояния структур среднего уха при оперативных вмешательствах, сочетающихся с установкой в барабанной полости имплантируемых слуховых аппаратов, основанных на методике прямой стимуляции структур среднего уха [1]. Непосредственный контроль подвижности барабанной перепонки и всей цепи слуховых косточек необходим на этапах дооперационного обследования больных, идущих на данное хирургическое вмешательство, и после него; кроме того, чрезвычайно необходимы и методы контроля подвижности и условий передачи энергии реконструированной цепью слуховых косточек во время проведения таких операций [2].

Первым вибрации барабанной перепонки в 1824 г. наблюдал Ф. Саварт (1791–1841), использовавший для этой цели мелкий песок – помещая его на поверхность препарата барабанной перепонки, он наблюдал его движение при действии звука. Э. Вебер (1795–1878) в 1851 г. писал о «поперечных колебаниях барабанной перепонки, передающихся на цепь слуховых косточек и вдавливающих стремя в овальное окно», при этом описывая их как «заметные невооруженным глазом» [3]. А. Политцеру (1835–1920) удалось записать колебания барабанной перепонки, а также рукоятки молоточка и наковальни,

¹ Исследование проведено при поддержке гранта «УМНИК» ФС МП НТС.

прикрепляя к ним волоски и записывая их движения на быстро вращающийся барабан [4]. В 1907 г. М. Ф. Цытовичем была защищена диссертация на тему «К вопросу о дыхательных и пульсаторных движениях барабанной перепонки», в которой им был использован вариант манометра Политцера [3]. В дальнейшем изучение колебаний барабанной перепонки неоднократно проводилось различными авторами, по мере научно-технического прогресса использовавшими все более современные и точные методы измерения вибраций.

Общеизвестными являются работы G. von Békésy [3], в которых он доказал, что различные зоны барабанной перепонки колеблются в различных режимах при действии звуковых волн; смещение барабанной перепонки составляет до 1 нм при пороговых уровнях звукового давления (использовался емкостный зонд Бакгауза). А. Wilska [3] использовал метод, заключающийся в применении для цели измерений приклеенной к барабанной перепонке деревянной палочки, которая соединена с катушкой, помещенной в сильное магнитное поле. Предварительная калибровка с использованием оптического микроскопа и аппроксимация получаемой калибровочной кривой на область малых значений неизбежно приводят в эксперименте к получению физически сомнительных значений амплитуд вибраций барабанной перепонки.

Для измерения подвижности барабанной перепонки в модельном опыте на кошках S. M. Khanna, J. Thondorf [5] использовали голографическую интерферометрию. В дальнейшем эти опыты неоднократно повторялись в различных модельных опытах, поскольку размеры и громоздкость установки ограничивали ее применение *in vivo*. Также в последние годы существует большое количество теоретических разработок механизма колебания барабанной перепонки и его моделирования [6]. При этом результаты моделирования в общем варьируют от 10 до 100 нм при различных уровнях звукового давления.

J. J Rosowski и соавторы [7] продемонстрировали основные возможности по измерению подвижности барабанной перепонки и структур среднего уха *in vivo* путем лазерной доплеровской виброметрии Polytec HLV-1000 (Polytec PI, USA) и ее дифференциально-диагностические признаки при кондуктивной тугоухости различного генеза. При патологии звукопроводящего аппарата, сопровождающейся фиксацией стремени, по данным авторов, происходит некоторое снижение регистрируемого уровня подвижности барабанной перепонки, тогда как в случаях рубцовых изменений в цепи слуховых косточек это снижение гораздо более выражено и хорошо различимо от измеренного нормального уровня подвижности барабанной перепонки. Но в качестве основного результата измерений лазерная доплеровская виброметрия предлагает использование скорости движения как основной характеристики вибраций микрообъектов; вычисление же непосредственно смещения барабанной перепонки из этих данных представляется довольно затруднительным. Для исследования смещения барабанной перепонки *in vitro* применялся и SQUID-зонд [8] – магнитометрический метод. С его помощью были получены значения смещения 200–500 нм при уровне звукового давления 100 дБ с тенденцией к уменьшению значений на высоких частотах; наблюдается линейная зависимость нарастания амплитуды смещения барабанной перепонки в зависимости от роста уровня звукового давления.

Таким образом, практически не существует точных данных об амплитуде колебаний барабанной перепонки, а также пригодного клинически метода измерений ее смещений, отличавшегося бы высокой чувствительностью.

2. Материалы и методы исследования

В настоящее время в связи с созданием лазерных автодинов на квантово-размерных структурах появилась возможность проводить измерения микро- и нановибраций биологической ткани *in vivo*. 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. Амплитуду колебаний барабанной перепонки определяют по спектру автодинного сигнала [9].

Авторами проведены исследования *in vivo* на лицах без патологии слуха (30 человек), на больных, страдающих сенсоневральной тугоухостью (50 человек), в случае наличия адгезивного отита (15 человек), при отосклерозе (3 человека), при наличии тубоотита (15 человек), на больных с острым гнойным средним неперфоративным отитом (20 человек), на лиц, страдающих хроническим гнойным средним отитом (10 человек). Исследования проводились в свободном звуковом поле, уровень звукового давления (УЗД) в наружном слуховом проходе регистрировался при помощи измерительной аппаратуры «Bruel & Kjaer». Исследование проводилось в зоне umbo барабанной перепонки.

3. Результаты собственных исследований

Исследована характеристика нарастания амплитуды смещения барабанной перепонки при повышении УЗД от 25 до 85 дБ на частотах 500, 1000, 2000, 4000 Гц (рис. 1), которая отражает линейную зависимость.

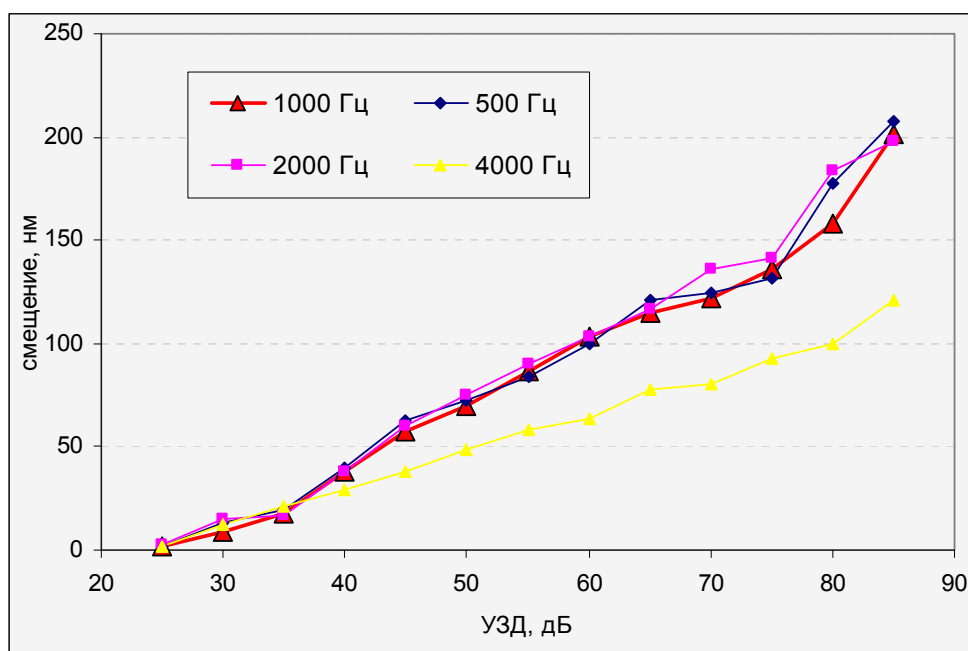


Рис. 1. Зависимость нарастания амплитуды смещения барабанной перепонки при повышении УЗД на различных частотах

На рис. 2 приведена амплитудно-частотная вибрационная характеристика барабанной перепонки (АЧВХ) у отологически здоровых лиц при УЗД

75 и 85 дБ. Амплитуда колебаний составляет от 60 до 200–250 нм на различных частотах. У лиц с сенсоневральной тугоухостью не было обнаружено значимых отклонений от результатов, полученных в группе здоровых лиц. Нарастание амплитуды у лиц с адгезивным отитом происходит более медленными темпами; кроме того, при низких уровнях звукового давления не удастся зафиксировать движений барабанной перепонки. При исследовании АЧВХ в этой группе имеется падение амплитуды колебаний барабанной перепонки, более выраженное в зоне средних и высоких частот (рис. 3).

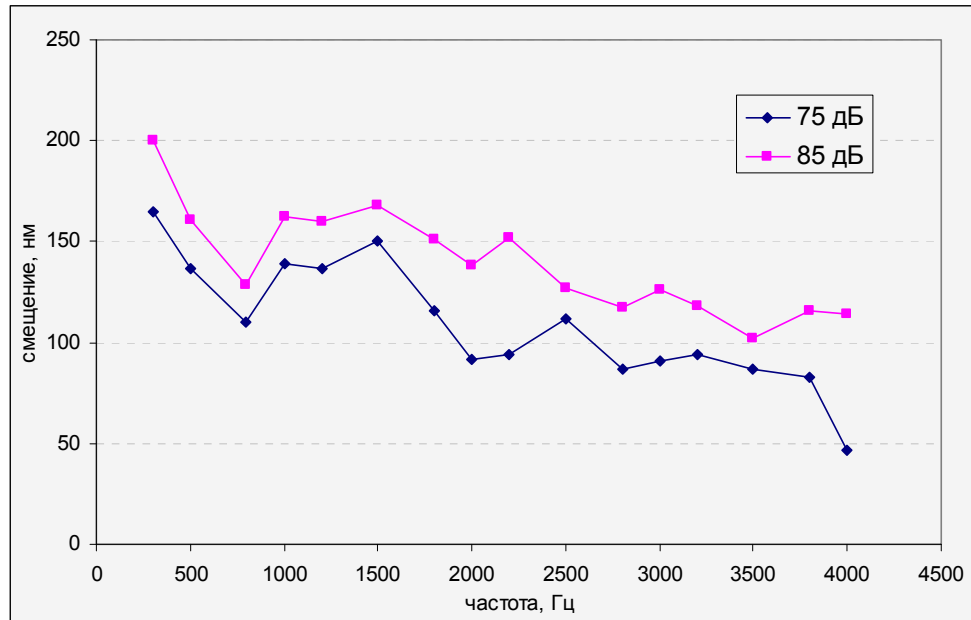


Рис. 2. Средняя АЧВХ барабанной перепонки у здоровых лиц, измеренная при УЗД 75 и 85 дБ

При отосклерозе не отмечается столь выраженного изменения нарастания амплитуды смещения колебаний и снижения амплитуды колебаний на АЧВХ перепонки, как при адгезивных процессах, несмотря на прослеживающуюся тенденцию к некоторому уменьшению амплитуды колебаний на низких частотах.

Исследования, проведенные нами на больных с острым гнойным средним неперфоративным отитом, показывают, что имеется значительное снижение амплитуды колебания барабанной перепонки в разгар заболевания. При этом снижение амплитуды колебаний происходит практически на всех частотах звукового спектра, больше всего – в зоне низких и средних частот.

У лиц, страдающих хроническим гнойным средним отитом, при исследовании обнаружены довольно значительные изменения в колебательной способности остатков барабанной перепонки, коррелирующие с размером перфорации в барабанной перепонке. При наличии значительных перфораций (занимающих 25–30 % площади барабанной перепонки) отмечается значительное повышение колебаний остатков барабанной перепонки. Это можно объяснить тем, что при нарушении анатомической целостности барабанной перепонки амплитуда колебания ее свободных краев значительно увеличива-

ется, наличие кондуктивной тугоухости у данных пациентов в основном определяется в таком случае не столько перфорацией барабанной перепонки, сколько отсутствием градиента давления при действии звуковой волны.

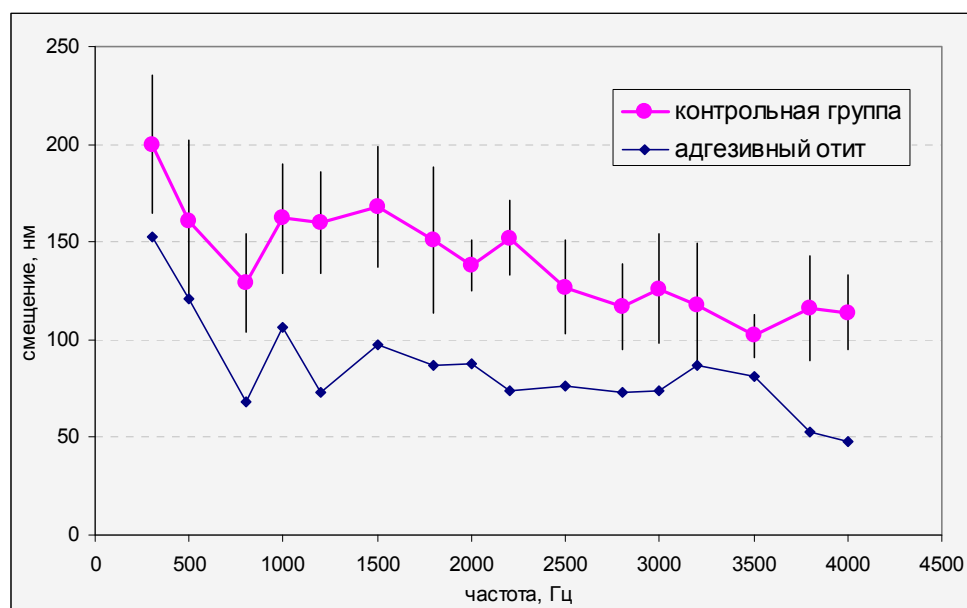


Рис. 3. АЧВХ барабанной перепонки при адгезивном отите, измеренная при уровнях громкости в 85 дБ, в сравнении со средним результатом контрольной группы

Заключение

Вывод о применимости данного метода в клинических исследованиях подтверждается изложенными выше данными. Метод лазерной автодинной диагностики несомненно имеет большую будущую значимость в фундаментальных исследованиях микромеханики среднего уха. Наличие видимых изменений в амплитудно-частотной характеристике при адгезивных процессах в среднем ухе, гнойных и экссудативных заболеваниях среднего уха, изменение графиков нарастания амплитуды колебаний барабанной перепонки в зависимости от уровня звукового давления в отличие от таковых в норме (а также при сенсоневральной тугоухости) делают данный метод применимым для дифференциальной диагностики этих процессов.

Список литературы

1. **Mosnier, I.** Benefit of the Vibrant Soundbridge device in patients implanted for 5 to 8 years / I. Mosnier, O. Sterkers, D. Bouccara // *Ear. Hear.* — 2008. — V. 29 (2). — P. 281–284.
2. **Hough, J.** Middle ear electromagnetic implantable hearing device-initial clinical results / J. Hough, R. Dyer, K. Dormer, P. Matthews, R. Z. Gan, M. Wood // *The Function and Mechanics of Normal, Diseased and Reconstructed Middle Ears* / J. Rosowski and S. Merchant (eds.). — Kugler Publications, Netherlands, 2000. — P. 353–366.
3. **Кобрак, Г.** Среднее ухо / Г. Кобрак. — М. : Медгиз, 1963. — 455 с.
4. **Finger, S.** Origins of Neuroscience / S. Finger. — Oxford University Press US, 2001. — 480 p.

5. **Tonndorf, J.** Submicroscopic displacement amplitudes of the tympanic membrane (cat) measured by a laser interferometer / J. Tonndorf, S. M. Khanna // J. Acoust. Soc. Am. – 1968. – V. 44. – P. 1546–1554.
6. **Wada, H.** Dynamic frequency characteristics of the middle ear in guinea pig: The finite-element analysis / H. Wada, T. Koike, T. Kobayashi // Audiology Japan. – 2002. – V. 45, № 4. – P. 289–297.
7. **Rosowski, J. J.** Diagnostic Utility of Laser-Doppler Vibrometry in Conductive Hearing Loss with Normal Tympanic Membrane / J. J. Rosowski, R. P. Mehta, S. N. Merchant // Otol Neurotol. – 2004. – № 25(3). – P. 323–332.
8. **Sosa, M.** Human ear tympanum oscillation recorded using a magnetoresistive sensor / A. Sosa, A. M. O. Carneiro, O. Baffa, J. F. Colafemina // Rev. Sci. Instrum. – 2002. – V. 73. – P. 3695.
9. **Усанов, Д. А.** Определение ускорения при микро- и наносмещениях по автодинному сигналу полупроводникового лазера на квантово-размерных структурах / Д. А. Усанов, А. В. Скрипаль, С. Ю. Добдин // ПЖТФ. – 2010. – Т. 36, вып. 21. – С. 78–84.

Мареев Глеб Олегович

кандидат медицинских наук, ассистент,
кафедра оториноларингологии,
Саратовский государственный
медицинский университет
им. В. И. Разумовского

E-mail: jey_trasher@mail.ru

Mareev Gleb Olegovich

Candidate of medical sciences, assistant,
sub-department of otolaryngology,
Saratov State Medical University
named after V. I. Razumovsky

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

Мареев, Г. О.

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