

## Измерение смещения барабанной перепонки лазерным автодинным методом в модельном опыте на височных костях домашней свиньи

Г.О. Мареев, О.В. Мареев

Саратовский Государственный медицинский университет им. В.И. Разумовского,  
Саратов

Контактная информация: Мареев Глеб Олегович [jev\\_trasher@mail.ru](mailto:jev_trasher@mail.ru)

---

Рассматриваются вопросы измерения подвижности барабанной перепонки при помощи лазерного автодина в модельных опытах на свежих препаратах височных костей домашних свиней. Проведены исследования на интактном ухе, с имитацией адгезивных процессов в среднем ухе и разрыва цепи слуховых косточек. Полученные данные свидетельствуют о возможности применения лазерного автодинного эффекта для измерения наносмещений биологических объектов.

**Ключевые слова:** среднее ухо, барабанная перепонка, адгезивный отит, лазерный автодин.

---

Измерение амплитуды смещения барабанной перепонки — чрезвычайно важный вопрос теоретической и практической медицины, который не решен и в настоящее время [1, 2]. Предлагавшиеся ранее способы неточны, либо весьма громоздки и не могут быть в дальнейшем развиты для использования *in vivo* [2, 6, 8, 9]. В настоящее время, в связи с созданием лазерных автодинов на квантоворазмерных структурах, появилась возможность проводить измерения микро- и нановибраций биологической ткани *in vivo* [3]. 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 [3, 4]. Для анализа автодинного сигнала в предположении гармоничности колебаний барабанной перепонки использовалась известная процедура разложения интерференционного сигнала в ряд по функциям Бесселя и в ряд Фурье. Амплитуду колебаний барабанной перепонки

определяют по спектру автодинного сигнала. В ряде работ [4, 5] установлена зависимость амплитуды гармоник, имеющей максимальное значение в спектре автодинного сигнала, от амплитуды колебаний барабанной перепонки.

Для определения вибрационных характеристик как отдельно барабанной перепонки, так и звукопроводящей цепи среднего уха в целом, нами проводилась серия модельных опытов, в которых использовались свежие препараты височных костей домашних свиней.

### Материалы и методы

В целях проведения исследования *in vitro* на нативном свежем препарате височных костей нами были использованы височные кости домашних свиней (*Sus scrofa domestica*), ввиду их схожести с человеческими по площади и строению барабанной перепонки, а также по приблизительно схожей анатомии и микромеханике среднего уха — близкие к человеческим размеры и вес слу-

ховых косточек [7]. Для исследования взяты животные породы крупная белая, возраст 183–195 дней, массой 95–115 кг, коммерческих генетических линий, полученные из ЗАО «Липовское», содержащиеся в конвенциональных условиях предприятия; животные были забиты на сертифицированном коммерческом предприятии, откуда получались непосредственно свежие препараты височных костей. Всего измерения проведены на 7 животных (13 ушей; у одного животного были обнаружены признаки хронического гнойного среднего отита с деструктивными изменениями в барабанной полости). Определенным отличием свиней от височной кости человека является неполное погружение лабиринта внутреннего уха в каменистую часть височной кости, а также более наклонное расположение медиальной стенки барабанной полости височной кости свиньи. Первое обстоятельство весьма способствует проведению измерений, так как облегчает методику препарирования и доступ к среднему уху с внутренней стороны височной кости, дает возможность аккуратно удалить слуховые косточки и провести измерения непосредственно вибрационных свойств барабанной перепонки. Наружный слуховой проход имеет иное направление, нежели у человека, а также более выраженный изгиб и довольно длинный хрящевой отдел, что является препятствием при доступе к барабанной перепонке через наружный слуховой проход и требует тщательной предварительной подготовки препарата. Использовались височные кости животных, время с момента смерти которых до проведения эксперимента не превышало 3–4 ч.

Экспериментальное определение амплитуд колебаний барабанной перепонки

проводилось с использованием автодиной измерительной системы [4, 5], схема которой приведена на рис. 1.

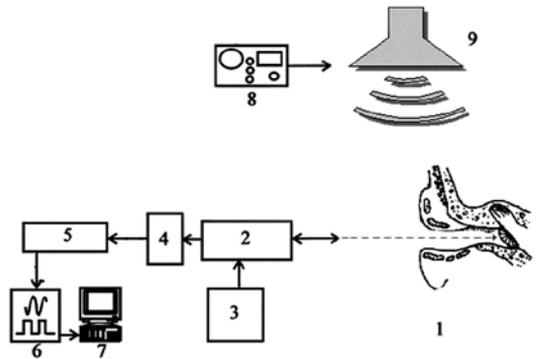


Рис. 1. Схема измерительной установки:

1 — барабанная перепонка с расширительной воронкой; 2 — лазерный диод на квантоворазмерных структурах; 3 — источник тока лазерного диода; 4 — фотоприемник; 5 — широкополосный усилитель, содержащий фильтр переменного сигнала; 6 — аналого-цифровой преобразователь; 7 — компьютер; 8 — генератор звуковых колебаний; 9 — излучатель звуковых волн.

В состав измерительной автодиной системы входит лазерный диод *RLD-650* 5 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 (исследование проводилось в свободном звуковом поле), работающий от генератора звуковых колебаний 8.

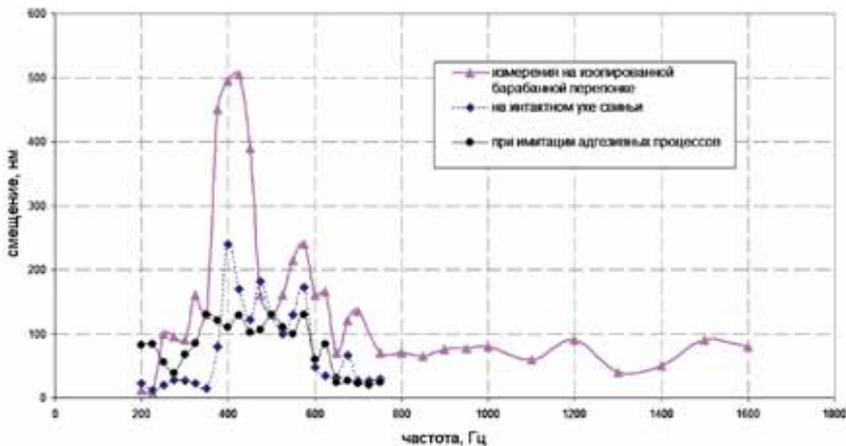


Рис. 2. Амплитудно-частотная характеристика барабанной перепонки, снятая при помощи лазерного автодинного метода при уровне звукового давления 85 дБ для:

- интактного препарата височной кости домашней свиньи;
- изолированного препарата барабанной перепонки домашней свиньи;
- при имитации адгезивных процессов в барабанной полости.

При исследовании снималась амплитудно-частотная вибрационная характеристика (АЧВХ) барабанной перепонки при уровне звукового давления у барабанной перепонки 65 и 85 дБ. Акустические измерения проводились при помощи акустического зонда и сертифицированного комплекса аппаратуры для акустических измерений фирмы «*Bruel & Kjaer*».

Исследования на интактном препарате среднего уха были произведены на 8 свежих препаратах височных костей домашней свиньи. При этом для получения адекватного доступа к барабанной перепонке долотами и бором практически полностью удалялась хрящевая и костная части наружного слухового прохода, вплоть до *annulus tympanicus*.

Исследования на препаратах среднего уха с имитацией разрыва цепи слуховых косточек были проведены на 2-х препаратах свежих височных костей домашней свиньи. Барабанная полость бором вскрывалась с внутренней стороны после удаления костного лабиринта, аккуратно удалялись слу-

ховые косточки. В результате становилась доступна для исследования непосредственно изолированная барабанная перепонка. Такой подход значительно облегчил приготовление препарата. Результаты измерения колебаний изолированной барабанной перепонки дают возможность судить о ее собственных резонансных частотах, а также представить в эксперименте модель ситуации с разобщением цепи слуховых косточек.

Имитация адгезивных процессов в барабанной полости проводилась на 3-х свежих препаратах височной кости домашней свиньи. Барабанная полость на этих препаратах была вскрыта с внутренней стороны по описанным выше методикам. На область наковаленно-молоточкового сустава наносилась капля резинового клея «Момент» (ОАО «Хенкель-ЭРА», Россия), которая также фиксировала сустав к стенке барабанной полости.

### Результаты и их обсуждение

Результаты исследования подвижности барабанной перепонки на свежих

препаратах височных костей домашней свиньи представлены на рис. 2 (при уровне звукового давления 85 дБ).

Хорошо заметно, что в низкочастотной области АЧВХ барабанной перепонки интактного среднего уха наблюдаются четыре максимума, соответствующие четырем резонансным частотам данной системы — 375, 475, 550 и 675 Гц. С увеличением интенсивности звукового воздействия значительно увеличивается амплитуда колебаний барабанной перепонки на частоте 550 Гц, а положение максимума незначительно смещается в область низких частот. Также происходит рост амплитуды колебаний на частоте 675 Гц, а амплитуда колебаний барабанной перепонки на остальных частотах возрастает незначительно. Отсюда можно сделать вывод, что для системы «барабанная перепонка — слуховые косточки» резонансными являются частоты 550 и 675 Гц. Максимальная зарегистрированная амплитуда составила 257 нм на частоте 550 Гц.

При измерениях подвижности на препарате среднего уха с разъединением цепи слуховых косточек было обнаружено, что барабанная перепонка, 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» барабанной перепонки наблюдаются максимумы амплитуды колебаний на частотах 370 и 575 Гц; отмечается равномерное увеличение амплитуды колебаний барабанной перепонки 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 уровне звукового давления, превышающего порог слышимости на 60 дБ.

Из сопоставления АЧВХ барабанной перепонки для случая целостного слухового аппарата и случая с разрывом в цепи «барабанная перепонка — слуховые косточки» можно сделать вывод, что диагностирование нарушения передаточной функции в цепи «барабанная перепонка — слуховые косточки» возможно по спектральной картине амплитудного отклика барабанной перепонки на звуковую нагрузку различной интенсивности. Амплитудный отклик контролируется по спектру сигнала полупроводникового лазерного излучателя на квантоворазмерных структурах, работающего в автодинном режиме.

На АЧВХ барабанной перепонки с имитацией адгезивных процессов в барабанной полости можно отметить статистически достоверное ( $p < 0,05$ ) снижение максимальной амплитуды вибрации барабанной перепонки до 80–100 нм, по сравнению с интактным препаратом височной кости домашней свиньи, явления резонанса выражены на частотах 400–600 Гц.

#### **Выводы:**

1. Лазерный автодинный измеритель наносмещений может использоваться для регистрации амплитуд вибрации биологических объектов с высокой точностью.
2. Измерения на свежих препаратах интактного среднего уха выявили резонансные частоты 550 и 675 Гц.
3. Максимальная зарегистрированная амплитуда вибрации барабанной перепонки интактного препарата составила 257 нм на частоте воздействия 550 Гц при уровне звукового давления 60 дБ;

при разрыве цепи слуховых косточек амплитуда колебаний в тех же условиях достигает 505 нм.

4. Отмечены достоверные отличия в регистрируемой данным методом амплитуде вибраций барабанной перепонки при имитации адгезивных процессов — снижение амплитуды вибрации барабанной перепонки до 80–100 нм, изменение частот ее резонанса.

5. Результаты указанных модельных опытов являются обоснованием экспериментальных исследований на человеке *in vivo*.

### Список литературы

1. **Гельфанд С. А.** Слух: введение в физиологическую и психологическую акустику: Пер. с англ. — М.: Медицина. 1984. 352 с.
2. **Кобрак Г.** Среднее ухо. — М.: Медгиз. 1963. 455 с.
3. **Усанов Д.А., Скрипаль Ал.В., Скрипаль А.В.** Физика полупроводниковых радиочастотных и оптических автодинов — Саратов: Изд-во Саратов. ун-та. 2003. 312 с.
4. **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.
5. **Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Камышанский А.С.** Измерение скорости нанометровых перемещений по спектру автодинного сигнала лазера на квантоворазмерных структурах // ПЖТФ. 2004. № 7. С. 77–82.
6. **Frenckner P.** Movements of the tympanic membrane and of the malleus in normal cases and in cases of otosclerosis // Acta Otolaryngol. 1939. Vol. 27. P. 587–607.
7. **Pracy J.P., White A., Mustafa Y., Smith D., Perry M.E.** The comparative anatomy of the pig middle ear cavity: a model for middle ear inflammation in the human? // J. Anat. 1998. Vol. 192. P. 359–368.
8. **Rosowski J.J., Merchant S.N.** The Function and Mechanics of Normal, Diseased and Reconstructed Middle Ears. — Kugler Publications. 2000. 400 p.
9. **Tonndorf J., Khanna S.M.** Submicroscopic displacement amplitudes of the tympanic membrane (cat) measured by a laser interferometer // J. Acoust. Soc. Amer. 1968. Vol. 44. P. 1546–1554.

## Measurement of shift of an eardrum by a laser avtodinny method in modeling experience on temporal bones of a house pig

G.O. Mareev, O.V. Mareev

The results of pig tympanic membrane mobility, measured by laser autodine effect are present in article. Fresh specimen of pig's temporal bone were used. Some measurements were made on intact middle ear structures, on the ear specimen with imitation of adhesive process and hearing chain destruction. Assessed results are important for further investigation of middle ear mechanics through laser autodine effect.

**Key words:** middle ear, tympanic membrane, adhesive otitis media, laser autodine.