

Анализ влияния синего лазерного излучения на структуру слуховых косточек и аудиологические результаты стапедопластики

В.М. Свиштушкин✉, Т.А. Демура, С.Т. Авраамова, Э.В. Синьков, В.П. Соболев, А.Р. Текоев, И.А. Зинченко

ФГАОУ ВО «Первый Московский государственный медицинский университет им. И.М. Сеченова» Минздрава России (Сеченовский Университет), Москва, Россия

Аннотация

Обоснование. Известно, что от 0,1 до 1% населения страдает отосклерозом, проявляющимся тугоухостью и ушным шумом. При тимпанальной и смешанной формах отосклероза проводится хирургическое лечение. Стапедопластика – эффективный способ хирургического лечения тугоухости при отосклерозе, но всегда есть риск нейросенсорной потери слуха, развития вестибулярных нарушений и паралича лицевого нерва. Использование излучения хирургических лазеров при проведении стапедопластики может значительно снизить риск осложнений или нежелательных явлений, однако не всякая длина волны лазерного излучения подходит для проведения стапедопластики. Наше исследование направлено на анализ гистологических изменений слуховых косточек после воздействия диодного синего лазера с длиной волны 445 нм.

Цель. Оценка микроструктурных (гистологических) изменений в слуховых косточках (в частности, основания стремени) при проведении стапедопластики с использованием диодного синего лазера, анализ размеров перфоративных отверстий в костной ткани, выявление эффектов термического воздействия на соседние интактные структуры и сравнение лазерной стапедопластики (ЛС) с поршневой методикой с использованием ручного микроперфоратора на основании тональной пороговой аудиометрии.

Материалы и методы. Для гистологической оценки безопасности использования диодного лазера с длиной волны 445 нм проведено экспериментальное исследование на замороженных слуховых косточках человека, изъятых у трупа. Лазером воздействовали на разные области косточек с различными параметрами мощности и времени, выбранными на основе предыдущих исследований. После воздействия образцы зафиксированы в растворе формалина и отправлены на гистологический анализ. Клиническое исследование спланировано как гибридное когортное с элементами проспективного и ретроспективного анализа. В группу ЛС входили пациенты, которым проводилась операция с использованием лазера с длиной волны 445 нм, – 52 пациента (36 женщин – 69,23%, 16 мужчин – 30,77%), в группу «Классическая стапедопластика» (КС) – пациенты, которых оперировали традиционным методом с использованием холодного инструментария, – 57 пациентов (42 женщины – 73,68%, 15 мужчин – 26,32%). Сравнение двух групп происходило по результатам тональной пороговой аудиометрии.

Результаты. Эффект термического воздействия, представленный участками некроза в окружении перфоративных отверстий, демонстрировал значения от 487 до 727 мкм, со средним значением $608,6 \pm 91,5$ мкм. Эти данные подчеркивают фокусированный характер теплового воздействия, при этом сохраненные участки вокруг костных дефектов не выявили морфологических различий с костями стремени в группе контроля. В позднем послеоперационном периоде (6 мес после операции) для костной проводимости в речевом диапазоне ($p=0,529$) и костной проводимости на высоких частотах ($p=0,894$) статистически значимых различий между группами не отмечено. Средние значения показывают значительное уменьшение коэффициента воздушно-костного интервала через 6 мес после операции, что подтверждается результатами парного t-теста.

Заключение. Микроструктурные измерения дали важную информацию о размерах перфоративных отверстий и тепловых эффектах, а гистологический анализ слуховых косточек подтвердил их относительную стойкость к лазерному излучению и тем самым безопасность воздействия на структуры среднего и внутреннего уха. По результатам тональной пороговой аудиометрии ЛС показывает высокую эффективность в улучшении слуха пациентов, сопоставимую с результатами КС. Полученные данные будут полезны для дальнейшего совершенствования методики стапедопластики с использованием лазерного излучения с длиной волны 445 нм и повышения ее безопасности.

Ключевые слова: отосклероз, стапедопластика, синий лазер, гистология, слуховые косточки

Для цитирования: Свиштушкин В.М., Демура Т.А., Авраамова С.Т., Синьков Э.В., Соболев В.П., Текоев А.Р., Зинченко И.А. Анализ влияния синего лазерного излучения на структуру слуховых косточек и аудиологические результаты стапедопластики. *Consilium Medicum*. 2025;27(9):531–537. DOI: 10.26442/20751753.2025.9.203207

Информация об авторах / Information about the authors

✉ **Свиштушкин Валерий Михайлович** – д-р мед. наук, проф., зав. каф. болезней уха, горла и носа Института клинической медицины им. Н.В. Склифосовского ФГАОУ ВО «Первый МГМУ им. И.М. Сеченова» (Сеченовский Университет). E-mail: svvm3@yandex.ru

Демура Татьяна Александровна – д-р мед. наук, проф., дир. Института клинической морфологии и цифровой патологии ФГАОУ ВО «Первый МГМУ им. И.М. Сеченова» (Сеченовский Университет)

Авраамова София Тариэловна – канд. мед. наук, доц. Института клинической морфологии и цифровой патологии ФГАОУ ВО «Первый МГМУ им. И.М. Сеченова» (Сеченовский Университет)

Синьков Эдуард Викторович – канд. мед. наук, доц. каф. болезней уха, горла и носа Института клинической медицины им. Н.В. Склифосовского ФГАОУ ВО «Первый МГМУ им. И.М. Сеченова» (Сеченовский Университет)

Соболев Василий Петрович – канд. мед. наук, доц. каф. болезней уха, горла и носа Института клинической медицины им. Н.В. Склифосовского ФГАОУ ВО «Первый МГМУ им. И.М. Сеченова» (Сеченовский Университет)

Текоев Артур Русланович – аспирант каф. болезней уха, горла и носа Института клинической медицины им. Н.В. Склифосовского ФГАОУ ВО «Первый МГМУ им. И.М. Сеченова» (Сеченовский Университет)

Зинченко Игорь Андреевич – стажер-исследователь каф. болезней уха, горла и носа Института клинической медицины им. Н.В. Склифосовского ФГАОУ ВО «Первый МГМУ им. И.М. Сеченова» (Сеченовский Университет)

✉ **Valery M. Svistushkin** – D. Sci. (Med.), Prof., Sechenov First Moscow State Medical University (Sechenov University). E-mail: svvm3@yandex.ru; ORCID: 0000-0001-7414-1293

Tatiana A. Demura – D. Sci. (Med.), Prof., Sechenov First Moscow State Medical University (Sechenov University). ORCID: 0000-0002-6946-6146

Sofya T. Avraamova – Cand. Sci. (Med.), Sechenov First Moscow State Medical University (Sechenov University). ORCID: 0000-0001-9704-5915

Eduard V. Sinkov – Cand. Sci. (Med.), Sechenov First Moscow State Medical University (Sechenov University). ORCID: 0000-0003-4870-5977

Vasilii P. Sobolev – Cand. Sci. (Med.), Sechenov First Moscow State Medical University (Sechenov University). ORCID: 0000-0002-7372-3299

Artur R. Tekoev – Graduate Student, Sechenov First Moscow State Medical University (Sechenov University). ORCID: 0000-0001-9511-9212

Igor A. Zinchenko – Assistant, Sechenov First Moscow State Medical University (Sechenov University). ORCID: 0009-0007-6499-5659

Analysis of the effect of blue laser radiation on the structure of the auditory ossicles and audiological results of stapedoplasty

Valery M. Svistushkin✉, Tatiana A. Demura, Sofya T. Avraamova, Eduard V. Sinkov, Vasilii P. Sobolev, Artur R. Tekoev, Igor A. Zinchenko

Sechenov First Moscow State Medical University (Sechenov University), Moscow, Russia

Abstract

Background. Studies show that from 0.1 to 1% of the population suffers from otosclerosis, manifested by hearing loss and ear noise. Surgical treatment is performed using stapedoplasty, but there is always a risk of sensorineural hearing loss, dizziness and facial nerve paralysis. The laser method of stapedoplasty can reduce the risks, but it is also associated with potential negative consequences. Our study is aimed at analyzing the histological changes in the auditory ossicles after exposure to a diode blue laser with a wavelength of 445 nm.

Aim. To evaluate microstructural (histological) changes in the auditory bones (in particular the base of the stirrup) during stapedoplasty using a diode blue laser; to analyze the size of perforations in bone tissue and identify the effects of thermal effects on neighboring intact structures.

Materials and methods. To histologically assess the safety of using a diode laser with a wavelength of 445 nm, an experimental study was conducted on frozen human auditory bones. Laser exposure was performed on different areas of the bones with different parameters of power and exposure time, selected on the basis of previous studies. After exposure, the samples were fixed in a formalin solution and sent for histological analysis.

Results. The effect of thermal exposure, represented by areas of necrosis surrounded by perforated holes, showed values from 487 to 727 μm , with an average value of $608.6 \pm 91.5 \mu\text{m}$. These data emphasize the focused nature of thermal exposure, while the preserved areas around bone defects did not reveal morphological differences with stirrup bones in the control group.

Conclusion. Microstructural measurements provided important information about the size of perforations and thermal effects, and histological analysis of the auditory ossicles confirmed their relative resistance to laser exposure, and thus the safety of exposure to the structures of the middle and inner ear. These results will be useful for further improvement of laser stapedoplasty techniques and increase its safety.

Keywords: otosclerosis, stapedoplasty, blue laser, histology, auditory ossicles

For citation: Svistushkin VM, Demura TA, Avraamova ST, Sinkov EV, Sobolev VP, Tekoev AR, Zinchenko IA. Analysis of the effect of blue laser radiation on the structure of the auditory ossicles and audiological results of stapedoplasty. *Consilium Medicum*. 2025;27(9):531–537.

DOI: 10.26442/20751753.2025.9.203207

Введение

По данным литературы, клинически выраженным отосклерозом страдает от 0,1 до 1% населения во всем мире, в то время как гистологический отосклероз выявляется у 10–12% населения [1–3]. Данные Бюро медицинской статистики Департамента здравоохранения г. Москвы показывают, что в структуре заболеваний уха в ЛОР-стационарах 5–8% составляют пациенты с отосклерозом. В то же время по данным сурдологических отделений за последнее десятилетие этот показатель составляет от 10 до 16%. Заболевание чаще всего встречается у социально активной части населения в возрасте от 15 до 45 лет и проявляется двусторонней тугоухостью и низкочастотным ушным шумом [4–6].

Впервые метод хирургического лечения отосклероза представлен в конце XIX в., после чего предложено множество модификаций этого хирургического вмешательства [7, 8]. На сегодняшний день основной метод лечения тимпанальной и смешанной форм отосклероза – хирургическое вмешательство, известное как стапедопластика [9, 10]. Основной и самый важный этап этой операции – перфорация основания стремени с последующей установкой протеза и изоляцией открытого преддверия, что традиционно выполняется с использованием специальных микроборов или ручного микроперфоратора [11].

Однако методика сопровождается значительной механической вибрацией и шумом, несет определенные риски в виде попадания костных фрагментов в ушной лабиринт, что, в свою очередь, может привести к нейросенсорной потере слуха и вестибулярным нарушениям [12, 13]. Для снижения таких рисков предложены и разработаны методики с использованием энергии лазера с различной длиной волны [14, 15]. Перкинс в 1980 г. впервые использовал аргонный лазер для точного формирования отверстия в подножной пластинке стремени [16, 17]. В настоящее время для этой операции применяются лазеры с различной длиной волны. Каждый из них обладает своими уникальными

особенностями, однако существует потенциал негативных последствий для внутреннего уха [18, 19].

Несмотря на доступность современных технологий, таких как микробор или различные виды лазеров, стапедопластика остается достаточно рискованной операцией [20, 21]. Неосторожные манипуляции во время хирургического вмешательства, а также неправильный выбор протеза стремени – наиболее распространенные причины кохлеовестибулярных нарушений в раннем послеоперационном периоде [22–24]. Поэтому современные хирургические лазеры активно внедряются в клиническую практику и становятся все более эффективным и безопасным инструментом для решения широкого спектра задач, в том числе и в отохирургии [25, 26].

Тем не менее при использовании хирургических лазеров существуют определенные риски, связанные с чрезмерным нагревом окружающих тканей, что потенциально опасно для структур среднего и внутреннего уха [27, 28].

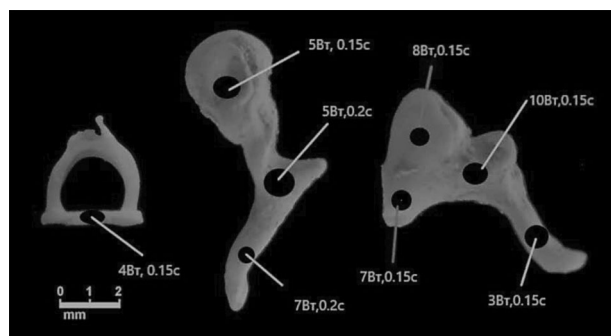
В нашей работе мы представляем результаты гистологического исследования слуховых косточек после воздействия диодного синего лазера с длиной волны 445 нм в различных режимах и разной мощности.

Цель исследования – оценка микроструктурных (гистологических) изменений в слуховых косточках (в частности, основания стремени) при проведении стапедопластики с использованием диодного синего лазера; анализ размеров перфоративных отверстий в костной ткани, выявление эффектов термического воздействия на соседние интактные структуры и сравнение лазерной стапедопластики (ЛС) с поршневой методикой с использованием ручного микроперфоратора на основании тональной пороговой аудиометрии.

Материалы и методы

Для гистологической оценки безопасности использования диодного лазера с длиной волны 445 нм («Лазер-мед-10-03») проведено исследование с использованием

Рис. 1. Точки воздействия лазерного луча на слуховые косточки с различными параметрами.



замороженных человеческих слуховых косточек, предоставленных кафедрой анатомии и гистологии человека ФГАОУ ВО «Первый МГМУ им. И.М. Сеченова» (Сеченовский Университет). Эксперимент рассмотрен и разрешен локальным этическим комитетом (протокол №19-22 от 06.10.2022).

Лучом синего лазера воздействовали на разные области слуховых косточек (молоточек, наковальню, стремя) с различными параметрами мощности и времени: 4 Вт, 0,15 с; 5 Вт, 0,15 с; 5 Вт, 0,2 с; 7 Вт, 0,2 с; 8 Вт, 0,15 с; 7 Вт, 0,15 с; 10 Вт, 0,15 с; 3 Вт, 0,15 с (рис. 1).

Такие значения выбраны исходя из результатов предыдущего экспериментального исследования по определению оптимальных параметров воздействия лазера с длиной волны 445 нм.

Точки воздействия определены исходя из симуляции этапов стапедопластики (рассечение сухожилия стремени, испарение наковальне-стремени сочленения, испарение задней ножки стремени, перфорация подножной пластины стремени).

После контактного воздействия лазера с длиной волны 445 нм образцы, фиксированные в 10% растворе нейтрального формалина, направлялись в Централизованное патологическое отделение ФГАОУ ВО «Первый МГМУ им. И.М. Сеченова» (Сеченовский Университет).

Далее препараты костной ткани декальцинировали раствором «СофтиДек» в концентрации 25 ммоль/дм³ на протяжении 3–6 ч. После декальцинации препараты промывали проточной водой, обезживали и заливали в блоки с парафином. Получали срезы толщиной 5 мкм, которые окрашивали гематоксилин-эозином. С помощью светового микроскопа Nikon анализировали изменения в костной ткани под воздействием лазерного луча. В группу контроля включили сохраненные кости стремени, полученные от пациентов без сопутствующей патологии внутреннего уха.

Стремя образовано пластинчатой костной тканью, снаружи выстлано однослойным плоским эпителием, а на суставной поверхности покрыто гиалиновым хрящом. После воздействия лазера с длиной волны 445 нм в области перфорации в костной ткани определялись скопления детрита, местами с отщеплением обугленных фрагментов кортикальной пластинки. Структура кортикальной пластинки не изменялась – сохранялись пустые клеточные лакуны (рис. 2).

Для сравнения представлен гистологический срез из контрольной группы без воздействия лазерного излучения (рис. 3).

Размер перфоративного отверстия в костной ткани варьировал, среднее значение составило 248,38±64,17 мкм, а эффект термического воздействия в виде участков некроза определялся в значениях 487–727 мкм (среднее значение составило 608,6±91,5 мкм). Сохранные участки, локализованные непосредственно вокруг костных дефектов, сформированных лазерным воздействием, не показали мор-

Рис. 2. Вид костной ткани стремени после лазерного воздействия: а – область перфорации; б – пустые клеточные лакуны; с – некротический детрит в очагах воздействия. Окрашивание гематоксилин-эозином. ×200.

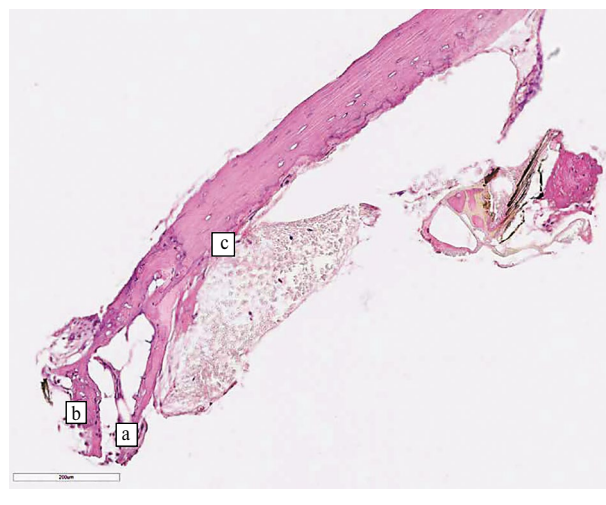
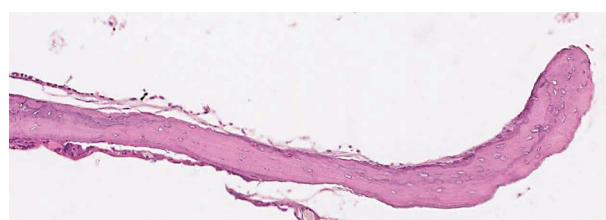


Рис. 3. Вид костной ткани стремени пациента группы контроля. Окрашивание гематоксилин-эозином. ×200.

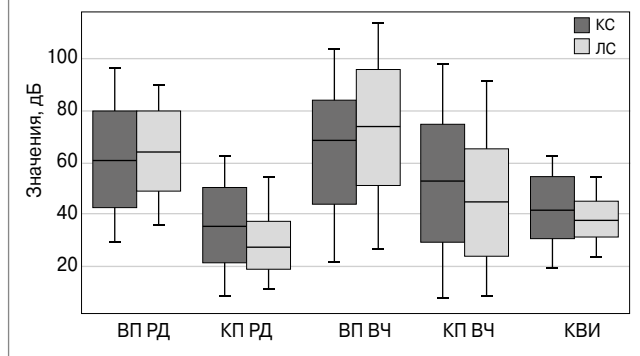


фологических различий с костями стремени пациентов группы контроля (см. рис. 3).

Клиническое исследование проводилось на базе Клиники болезней уха, горла и носа, в оториноларингологическом отделении Университетской клинической больницы №1 Клинического центра ФГАОУ ВО «Первый МГМУ им. И.М. Сеченова» (Сеченовский Университет) в период с июня 2021 по июль 2023 г., спланировано как гибридное когортное клиническое исследование с элементами проспективного и ретроспективного анализа. В группу «Лазерная стапедопластика» (ЛС) входили пациенты, которым проводилась операция с использованием лазера с длиной волны 445 нм, – 52 пациента (36 женщин – 69,23%, 16 мужчин – 30,77%), в группу «Классическая стапедопластика» (КС) – пациенты, которых оперировали традиционным методом с использованием холодного инструментария, – 57 пациентов (42 женщины – 73,68%, 15 мужчин – 26,32%).

В течение первых 10 дней после операции пациенты находились под наблюдением в оториноларингологическом отделении. Слуховую функцию у пациентов оценивали методом тональной пороговой аудиометрии на приборе GSI/Grason-Stadler, после стапедопластики выполняли анализ порогов костной проводимости – КП (оценивали степень повреждения внутреннего уха) на 2–3-и сутки и 7–10-й день после операции. Перед этим на 7 или 8-й день послеоперационного периода из наружного слухового прохода удаляли гемостатическую губку и полоски медицинского силикона. Через 3 и 6 мес после операции пациентов приглашали на повторный осмотр, в ходе которого проводили контрольную тональную пороговую аудиометрию.

Аудиторную функцию оценивали через измерение коэффициента воздушно-костного интервала (КВИ) и определения порогов слуха по воздушной проводимости (ВП) на частотах 0,5, 1, 2 и 4 кГц. Для определения степени по-

Рис. 4. Сравнение аудиологических показателей в группах до стапедопластики.

ражения внутреннего уха анализировали пороги слуха по КП на частотах 4 и 8 кГц. Расчет среднего значения порогов производился по методу среднего арифметического в указанном частотном диапазоне.

Результаты

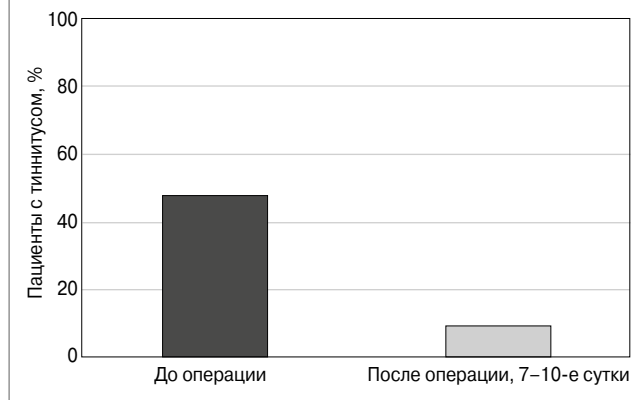
Результаты макро- и микроскопического лазерного воздействия в условиях *ex vivo*. Анализ размеров точек лазерной абляции в костной ткани, образованных в результате воздействия лазерного луча на слуховые кости, выявил их вариабельность в зависимости от мощности и времени воздействия излучения. Среднее значение составило $248,38 \pm 64,17$ мкм. Стоит отметить важность взаимодействия лазерного излучения с мукопериостом подножной пластины стремени, который подвергается перфорации лазерным лучом, что подчеркивает значимость гемостаза в этом процессе, поскольку мукопериост имеет активное кровоснабжение [14–17]. Еще один значимый с клинической точки зрения аспект – неполная перфорация подножной пластины стремени позволяет не делать второй импульс (выстрел) лазерного воздействия (риск перегрева перилимфы), так как созданную «насечку» (участок неполной перфорации) можно перфорировать ручным холодным микроинструментом без опасности возникновения интраоперационных осложнений (кровотечения мукопериоста, мобилизации и трещин подножной пластины стремени). Размер полученной перфорации подножной пластины стремени при оптимальных параметрах (4 Вт, 0,15 с) составил 0,6 мм, что позволяет установить стандартный титановый протез типа «К-пистон» с диаметром 0,4 мм.

Термическое воздействие проявлялось в виде зон коагуляционного некроза, окружающих перфоративные отверстия, в диапазоне 487–727 мкм (среднее $608,6 \pm 91,5$ мкм). Эти данные подчеркивают фокусированный характер теплового воздействия, при этом сохраненные участки вокруг костных дефектов не выявили морфологических различий с костями стремени в группе контроля (см. рис. 3).

Результаты исследования подтверждают, что лентиккулярный отросток наковальни остается сохранным после воздействия лазера при проведении стапедопластики. Морфологические анализы не выявили значительных изменений в структуре лентиккулярного отростка после лазерного воздействия, что подчеркивает его устойчивость к негативным эффектам.

Гистологическое исследование слуховых косточек после действия диодного лазера выявило, что деструкция костной ткани имеет очаговый характер и ограничивается участком пятна воздействия лазерного луча. Наблюдаемые изменения не затрагивают сохраненные участки структур барабанной полости, что подтверждает безопасность процедуры и сохранность тканевой целостности.

Полученные макро- и микроморфологические данные подтверждают, что контактное воздействие диодного син-

Рис. 5. Процентное соотношение пациентов с тиннитусом до и после операции на 7–10-е сутки.

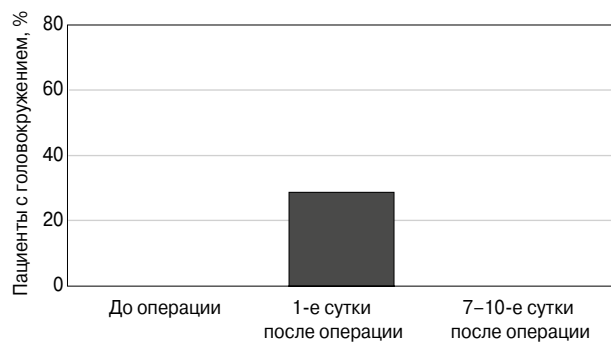
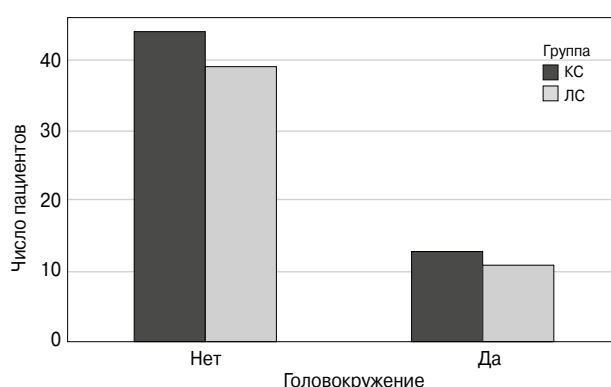
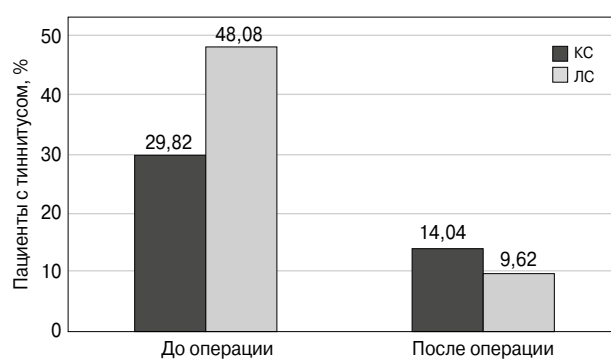
го лазера 445 нм формирует контролируемую перфорацию подножной пластины с воспроизводимым диаметром (при 4 Вт, 0,15 с $\approx 0,6$ мм) и ограниченной термозоной коагуляционного некроза 487–727 мкм (в среднем $608,6 \pm 91,5$ мкм), без морфологических изменений в сохранных участках, прилежащих к дефекту, и при сохранности лентиккулярного отростка. С практической точки зрения сочетание 4 Вт, 0,15 с обеспечивает целевую перфорацию, при неполной перфорации ее безопасно завершать холодным инструментом, избегая повторного импульса (минимизация перегрева перилимфы). Эти результаты послужили основанием для выбора параметров и перехода к клинической оценке эффективности и безопасности лазерной стапедопластики.

Результаты клинической части исследования. Дооперационные аудиологические показатели сопоставимы в обеих группах, что позволило оценить исходные условия для каждого метода операции. Пороги слуха как по ВП, так и по КП находились примерно на одинаковом уровне, что обеспечило надежную базу для последующего сравнения результатов операций (рис. 4). Данные о порогах КП до операции показывают среднее значение на уровне 24 дБ для частот от 250 до 4000 Гц и 25 дБ на 8000 Гц. Пороги ВП значительно выше – среднее составляет 58 дБ на тех же частотах и 65 дБ на частоте 8000 Гц. Это указывает на наличие смешанной тугоухости у исследуемых пациентов, что подтверждается воздушно-костным интервалом со средним значением 35 дБ.

В группе ЛС мы сравнили долю пациентов с ушным шумом (переменная бинарная, код 1/0, среднее значение интерпретируется как доля) до операции и на 7–10-е сутки. Парный t-тест показал статистически значимое снижение доли пациентов с тиннитусом: до операции – 0,480769, на 7–10-е сутки – 0,096154, $t=4,27$, $p=0,000045$. На рис. 5 приведено процентное соотношение пациентов с тиннитусом до и после операции, что визуально подтверждает выраженное снижение симптома.

На столбчатой диаграмме (рис. 6) показан процент пациентов, испытывающих головокружение в разные периоды до и после операции: до операции – 0 пациентов, на 1-е сутки после операции 28,85% пациентов пожаловались на субъективное ощущение головокружения (подтверждено определением нистагма), на 7–10-е сутки после операции – 0 пациентов. Эти результаты указывают на значимое увеличение головокружения в 1-е сутки после операции с последующим его исчезновением к 7–10-м суткам после операции. Это может быть связано с непосредственными последствиями хирургического вмешательства, которые быстро регрессируют в течение первой послеоперационной недели.

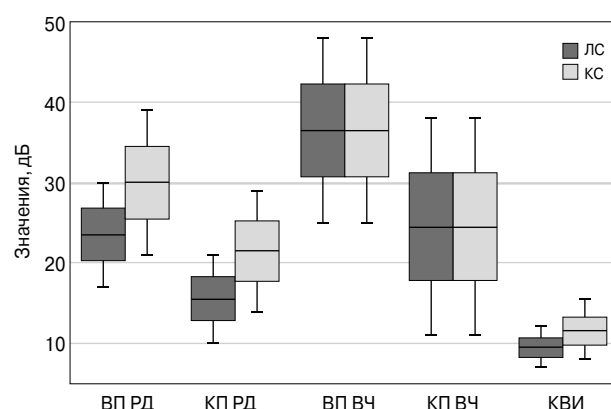
На основе статистического анализа данных о головокружении на 1-е сутки после операции по КС и ЛС не обнаружено значимых различий в частоте этого побочного эф-

Рис. 6. Процент пациентов с головокружением в различные периоды.**Рис. 7. Частота головокружения на 1-е сутки после операции для двух групп.****Рис. 8. Сравнение показателя шума в ушах по группам.**

фекта между 2 группами пациентов (рис. 7). Результат теста Манна-Уитни показывает, что статистически значимых различий в интенсивности головокружения на 1-е сутки после операции между группами ЛС и КС нет ($p=0,712$).

Процентное уменьшение тиннитуса после операции на 1-е сутки в группе КС составило 52,94%, в то время как в группе ЛС это уменьшение достигло 81,48% (рис. 8). Однако результаты Z-теста для сравнения пропорций показали, что статистически значимых различий между двумя группами нет (Z -статистика=0,884, $p=0,377$), т. е. различие в процентных показателях уменьшения тиннитуса между КС и ЛС статистически не подтверждается.

Краткосрочные результаты (7-10-е сутки после операции) показали улучшение слуха в обеих группах, что демонстрирует эффективность описанных методов стапедопластики. В позднем послеоперационном периоде для КП речевого диапазона – РД ($p=0,529$) и КП высоких частот – ВЧ ($p=0,894$) статистически значимых различий не обнару-

Рис. 9. Распределение аудиологических показателей через 6 мес после операции в группах ЛС и КС.**Таблица 1. Ключевые аудиологические и статистические показатели для каждой из групп в послеоперационном периоде на 7-10-е сутки**

Параметр	КС		ЛС	
	Медиана [Q1; Q3]	Мин. – Макс.	Медиана [Q1; Q3]	Мин. – Макс.
ВП РД	36 [29; 44]	15–85	32 [26; 39]	18–85
КП РД	26 [17; 34]	6–74	23 [15; 30]	7–75
ВП ВЧ	32 [34; 55]	15–70	49 [35; 48]	18–95
КП ВЧ	29 [16; 41]	9–86	29 [16; 45]	11–82
КВИ	17 [13; 20]	5–41	15 [12; 18]	6–36

Таблица 2. Ключевые аудиологические и статистические показатели для каждой из групп в послеоперационном периоде через 6 мес

Параметр	ЛС				КС			
	Медиана	Q1; Q3	Мин.	Макс.	Медиана	Q1; Q3	Мин.	Макс.
ВП РД	24	17; 30	15	75	30	21; 39	12	79
КП РД	14	10; 21	7	71	21	14; 29	5	71
ВП ВЧ	32	25; 48	14	89	27	25; 48	12	63
КП ВЧ	22	11; 38	9	78	25	11; 38	9	76
КВИ	9	7; 12	4	22	10	8; 15	4	27

жено, что указывает на сопоставимые результаты между группами в этих параметрах (табл. 1).

Сравнение аудиологических данных через 6 мес после операции отражено в табл. 2 и на рис. 9. Результаты статистического теста Манна-Уитни показывают следующее: ВП РД – значимые различия между группами ($p=0,0026$); КП РД – значимые различия между группами ($p=0,0032$); ВП ВЧ – различия статистически незначимы ($p=1,0$); КП ВЧ – различия статистически незначимы ($p=1,0$); КВИ – различия статистически незначимы ($p=0,1533$).

Это означает, что на уровне слуховых порогов в РД (как для ВП, так и для КП) наблюдаются статистически значимые различия между ЛС и КС через 6 мес после операции. Для других параметров значимых различий не обнаружено.

В позднем послеоперационном периоде (6 мес после операции) для КП РД ($p=0,529$) и КП ВЧ ($p=0,894$) статистически значимых различий не обнаружено (см. рис. 9). Средние значения показывают значительное уменьшение КВИ через 6 мес после операции, что подтверждается результатами парного t-теста.

Обсуждение

В ходе исследования, направленного на оценку микроструктурных изменений в слуховых косточках при стапедопластике с использованием диодного синего лазера, получены результаты, которые заслуживают внимания и дальнейшего обсуждения. Размеры перфоративных отверстий в костной ткани оказались переменными в зависимости от мощности и времени воздействия излучения, а эффект термического воздействия проявился в форме участков некроза с разнообразием размеров.

Выявлено отсутствие морфологических различий в сохранных участках, окружающих костные дефекты, между костями стремени после лазерного воздействия (*ex vivo*) и костями контрольной группы без воздействия (см. рис. 3). Это указывает на высокую фокусировку воздействия лазера на целевые структуры, минимальное воздействие на соседние ткани и потенциальную безопасность процедуры.

Анализ теплового воздействия на перилимфу, несмотря на свою значимость, остается недостаточно освещенным в литературе. Результаты нашего предыдущего исследования с физическими параметрами вычисления нагревания жидкости подчеркивают влияние тепловых эффектов на перилимфу: это может привести к оптимизации лазерных методов и повышению безопасности лазерной отоларингологии.

Результаты нашей статьи представляют важность для развития методов стапедопластики с использованием диодного лазера и подчеркивают необходимость дополнительных исследований в области воздействия лазера на структуры внутреннего уха с учетом их физиологических и оптических особенностей.

Стоит отметить еще один значимый аспект работы – исследование некроза лентикулярного отростка наковальни (наковальне-стремное сочленение) после воздействия лазера. Лентикулярный отросток – ключевая структура в механизме передачи звуковых колебаний, так как стапедальный протез типа «К-пистон» впоследствии навешивается именно в этой области. Воздействие лазерного излучения на эту структуру может вызвать различные изменения, включая тепловой стресс, денатурацию белков и в итоге некротические процессы. Наблюдаемый некроз лентикулярного отростка может быть обусловлен не столько прямым воздействием лазера, сколько непосредственной связью с пережатым стапедальным протезом типа «К-пистон».

Аудиологические результаты представляют собой ключевой компонент оценки эффективности и безопасности стапедопластики. Исследование охватывает комплексное аудиологическое обследование пациентов, которое включало пороги слуха по КП и ВП на различных частотах. Дооперационные аудиологические показатели сопоставимы в обеих группах, что позволило оценить исходные условия для каждого метода операции. Пороги слуха как по ВП, так и по КП находились примерно на одинаковом уровне, что обеспечило надежную базу для последующего сравнения результатов операций.

Данные о порогах КП до операции показывают среднее значение на уровне 24 дБ для частот от 250 до 4000 Гц и 25 дБ на 8000 Гц. Пороги воздушной проводимости значительно выше – среднее составляет 58 дБ на тех же частотах и 65 дБ на частоте 8000 Гц. Это указывает на наличие смешанной тугоухости у исследуемых пациентов, что подтверждается воздушно-костным интервалом со средним значением 35 дБ. Краткосрочные результаты (7–10 дней после операции) показали улучшение слуха в обеих группах, что демонстрирует эффективность описанных методов стапедопластики. В позднем послеоперационном периоде для КП РД ($p=0,529$) и КП ВЧ ($p=0,894$) статистически значимых различий не обнаружено, что указывает на сопоставимые результаты между группами в этих параметрах. Особенно заметно улучшение слуховой функции на сроке 6 мес после операции, где пороги КП снижаются до 14 дБ,

что на 13 дБ ниже начальных значений. Пороги ВП также улучшились, достигнув 24 дБ против исходных 65 дБ. Следовательно, процедура ЛС способствует значительному улучшению слуха, что подтверждается статистическим анализом с использованием *t*-критерия Стьюдента и теста Манна–Уитни.

Таким образом, обобщая представленные данные, можно констатировать значительное улучшение слуховой функции у пациентов после проведения КС и ЛС. Улучшение порогов слуха подтверждается не только статистически значимыми данными, но и отсутствием серьезных послеоперационных осложнений, что также говорит в пользу метода ЛС.

Заключение

Проведенное исследование гистологических изменений в слуховых косточках в результате ЛС с использованием диодного синего лазера с длиной волны 445 нм расширило наши знания о воздействии лазерного излучения на ткани среднего и внутреннего уха. Микроструктурные измерения дали важную информацию о размерах перфоративных отверстий и тепловых эффектах, а гистологический анализ слуховых косточек подтвердил их относительную стойкость к лазерному излучению и тем самым безопасность воздействия на структуры среднего уха. Важно также отсутствие морфологических различий в лентикулярном отростке наковальни, за исключением случаев, связанных с пережатием протеза. По результатам тональной пороговой аудиометрии ЛС показывает высокую эффективность в улучшении слуха пациентов, сопоставимую с результатами КС с использованием холодных инструментов. Это подчеркивает функциональную эффективность использования лазера с длиной волны 445 нм. Полученные данные будут полезны для дальнейшего совершенствования методики ЛС и повышения ее безопасности.

Раскрытие интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Disclosure of interest. The authors declare that they have no competing interests.

Вклад авторов. Авторы декларируют соответствие своего авторства международным критериям ICMJE. Все авторы в равной степени участвовали в подготовке публикации: разработка концепции статьи, получение и анализ фактических данных, написание и редактирование текста статьи, проверка и утверждение текста статьи.

Authors' contribution. The authors declare the compliance of their authorship according to the international ICMJE criteria. All authors made a substantial contribution to the conception of the work, acquisition, analysis, interpretation of data for the work, drafting and revising the work, final approval of the version to be published and agree to be accountable for all aspects of the work.

Источник финансирования. Авторы декларируют отсутствие внешнего финансирования для проведения исследования и публикации статьи.

Funding source. The authors declare that there is no external funding for the exploration and analysis work.

Соответствие принципам этики. Протокол исследования одобрен локальным этическим комитетом [ФГАОУ ВО «Первый МГМУ им. И.М. Сеченова» (Сеченовский Университет), протокол №19-22 от 06.10.2022]. Одобрение и процедуру проведения протокола получали по принципам Хельсинкской декларации.

Compliance with the principles of ethics. The study protocol was approved by the local ethics committee (No. 19-22 dated 06.10.2022). Approval and protocol procedure was obtained according to the principles of the Declaration of Helsinki.

Литература/References

- Преображенский Н.А., Пятакина О.К. Тугоухость при отосклерозе. В кн.: Тугоухость. М.: Медицина, 1978; с. 221-36 [Preobrazhenskii NA, Ptiakina OK. Tugoukhost pri otoskleroze. In: Tugoukhost. Moscow: Meditsina, 1978. P. 221-36 (in Russian)].
- Pauli N, Strömbäck K, Lundman L, Dahlin-Redfors Y. Surgical technique in stapedotomy hearing outcome and complications. *Laryngoscope*. 2020;130(3):790-6. DOI:10.1002/lary.28072
- Гадян А.Т., Янов Ю.К., Левинина М.В., Аникин И.А. Анализ результатов стапедопластики, выполненной традиционным способом и с помощью лазера, при отосклерозе и адгезивном отите. *Российская оториноларингология*. 2008;(2):216-20 [Gadian AT, Yanov IuK, Levinina MV, Anikin IA. Analiz rezultatov stapedoplastiki, vypolnennoi traditsionnom sposobom i s pomoshchiu lazera, pri otoskleroze i adgezivnom otite. *Rossiiskaia otorinolaringologiya*. 2008;(2):216-20 (in Russian)].
- Garin P, Van Prooyen-Keyser S, Jamart J. Hearing outcome following laser-assisted stapes surgery. *J Otolaryngol*. 2002;31(1):31-4. DOI:10.2310/7070.2002.19196
- Parida PK, Kalaiarasi R, Gopalakrishnan S. Diode Laser Stapedotomy vs Conventional Stapedotomy in Otosclerosis: A Double-Blinded Randomized Clinical Trial. *Otolaryngol Head Neck Surg*. 2016;154(6):1099-105. DOI:10.1177/0194599816635132
- Malafonte G, Filosa B, Barillari MR. Stapedotomy: is the color of the footplate important in the choice of the type of perforator? *Otol Neurotol*. 2011;32(7):1047-9. DOI:10.1097/MAO.0b013e31822a1ccc
- Boyev KP. Use of Lasers in Otosclerosis Surgery. *Otolaryngol Clin North Am*. 2018;51(2):405-13. DOI:10.1016/j.otc.2017.11.009
- Haberkamp TJ, Harvey SA, Khafagy Y. Revision stapedectomy with and without the CO₂ laser: an analysis of results. *Am J Otol*. 1996;17(2):225-9. Available at: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/8723952/> Assessed: 01.03.2025.
- Buchman CA, Fucci MJ, Roberson JB, De La Cruz A. Comparison of argon and CO₂ laser stapedotomy in primary otosclerosis surgery. *Am J Otolaryngol*. 2000;21(4):227-30. DOI:10.1053/ajot.2000.8380
- Motta G, Moschillo L. Functional results in stapedotomy with and without CO(2) laser. *ORL J Otorhinolaryngol Relat Spec*. 2002;64(5):307-10. DOI:10.1159/000066079
- Shabana Y, Allam H, Pedersen C. Laser stapedotomy. *J Laryngol Otol*. 1999;113(5):413-6. DOI:10.1017/S0022215100144111
- Barbara M, Lazzarino AI, Murè C, et al. Laser Versus Drill-Assisted Stapedotomy for the Treatment of Otosclerosis: A Randomized-Controlled Trial. *Journal of International Advanced Otolaryngology*. 2011;7:283-8. Available at: <https://www.advancedotology.org/en/laser-versus-drill-assisted-stapedotomy-for-the-treatment-of-otosclerosis-a-randomized-controlled-trial-161193>. Assessed: 01.03.2025.
- Vincent R, Bittermann AJN, Oates J, et al. KTP Versus CO₂ Laser Fiber Stapedotomy for Primary Otosclerosis. *Otol Neurotol*. 2012;33(6):928-33. DOI:10.1097/MAO.0b013e31825f24ff
- Fang L, Lin H, Zhang TY, Tan J. Laser versus non-laser stapedotomy in otosclerosis: a systematic review and meta-analysis. *Auris Nasus Larynx*. 2014;41(4):337-42. DOI:10.1016/j.anl.2013.12.014
- Yavuz H, Caylakli F, Ozer F, Ozluoglu LN. Reliability of microdrill stapedotomy: comparison with pick stapedotomy. *Otol Neurotol*. 2007;28:998-1001. DOI:10.1097/MAO.0b013e31815a3548
- Young E, Mitchell-Innes A, Jindal M. Lasers in stapes surgery: a review. *J Laryngol Otol*. 2015;129(7):627-33. DOI:10.1017/s0022215115001280
- Perkins RC. Laser stapedotomy for otosclerosis. *Laryngoscope*. 1980;90(2):228-40. DOI:10.1288/00005537-198002000-00007
- Casazza GC, Thomas AJ, Dewey J, et al. Variations in stapes surgery cost within a multihospital network. *Otolaryngol Head Neck Surg*. 2019;161(5):835-41. DOI:10.1177/0194599819855055
- Frenz M. Physical characteristics of various lasers used in stapes surgery. *Adv Otorhinolaryngol*. 2007;65:237-49. DOI:10.1159/000098838
- Young E, Mitchell-Innes A, Jindal M. Lasers in stapes surgery: a review. *J Laryngol Otol*. 2015;129(7):627-33. DOI:10.1017/s0022215115001280
- Wegner I, Kamalski DM, Tange RA, et al. Laser versus conventional fenestration in stapedotomy for otosclerosis: a systematic review. *Laryngoscope*. 2014;124(7):1687-93. DOI:10.1002/lary.24514
- Fang L, Lin H, Zhang TY, Tan J. Laser versus non-laser stapedotomy in otosclerosis: A systematic review and meta-analysis. *Auris Nasus Larynx*. 2014;41(4):337-42. DOI:10.1016/j.anl.2013.12.014
- Bartel R, Huguet G, Cruellas F, et al. Laser vs drill for footplate fenestration during stapedotomy: a systematic review and meta-analysis of hearing results. *Eur Arch Otolaryngol*. 2021;278:9-14. DOI:10.1007/s00405-020-06117-1
- Smyth G, Hassard T. Eighteen years of experience with stapedotomy, the case of small fenestra operation. *Ann Otol Rhinol Laryngol Suppl*. 1978;49:87-92. DOI:10.1177/00034894780870s301
- Langman A, Lindeman R. Revision stapedectomy. *Laryngoscope*. 1993;103(9):954-8. DOI:10.1288/00005537-199309000-00002
- Вишняков В.В., Свистушкин В.М., Синьков Э.В. Современные высокоэнергетические лазерные технологии при хирургическом лечении больных отосклерозом. *Вестник Оториноларингологии*. 2017;82(1):56-8 [Vishniakov VV, Svistushkin VM, Sinkov EV. The application of the modern high-energy laser technologies for the surgical treatment of the patients presenting with otosclerosis. *Vestn Otorinolaringol*. 2017;82(1):56-8 (in Russian)]. DOI:10.17116/otorino201782156-58
- Arnoldner C, Schwab B, Lenarz T. Clinical results after stapedotomy: a comparison between the erbium: yttrium-aluminum-garnet laser and the conventional technique. *Otol Neurotol*. 2006;27:458-65. DOI:10.1097/01.mao.0000217355.96334.ba
- Свистушкин В.М., Синьков Э.В., Стожкова И.В. Этиопатогенетические аспекты отосклероза. *Российская оториноларингология*. 2021;20(5):68-74 [Svistushkin VM, Sinkov EV, Stozhkova IV. Etiopathogenetic aspects of otosclerosis. *Rossiiskaia otorinolaringologiya*. 2021;20(5):68-74 (in Russian)]. DOI:10.18692/1810-4800-2021-5-68-74

Статья поступила в редакцию / The article received: 11.03.2025

Статья принята к печати / The article approved for publication: 23.10.2025



OMNIDOCTOR.RU