

ФИЗИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ХИРУРГИЧЕСКОГО ЛАЗЕРА С ДЛИНОЙ ВОЛНЫ 445 НМ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ СТАПЕДОПЛАСТИКИ

В.М. Свистушкин¹, Э.В. Синьков¹, В.П. Соболев¹, Г.А. Варев², А.Р. Текоев¹

¹Московский государственный медицинский университет имени И.М. Сеченова (Сеченовский Университет) (Москва, Российская Федерация)

²ООО «Русский инженерный клуб» (Тула, Российская Федерация)

Для цитирования: В.М. Свистушкин, Э.В. Синьков, В.П. Соболев, Г.А. Варев, А.Р. Текоев. **Физическое обоснование безопасности применения хирургического лазера с длиной волны 445 нм при проведении стапедопластики.** *Аспирантский вестник Поволжья.* 2024;24(2):26-31. DOI: <https://doi.org/10.35693/AVP630305>

■ Сведения об авторах

Свистушкин В.М. – д-р мед. наук, профессор, заведующий кафедрой болезней уха, горла и носа Института клинической медицины имени Н.В. Склифосовского.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7414-1293> E-mail: svvm3@yandex.ru

Синьков Э.В. – канд. мед. наук, доцент кафедры болезней уха, горла и носа Института клинической медицины имени Н.В. Склифосовского.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4870-5977> E-mail: 1178461@mail.ru

Соболев В.П. – канд. мед. наук, доцент кафедры болезней уха, горла и носа Института клинической медицины имени Н.В. Склифосовского.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7372-3299> E-mail: sobolev_v_p@staff.sechenov.ru

Варев Г.А. – канд. тех. наук, генеральный директор.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-0543-2477> E-mail: info@lasermed.ru

Текоев А.Р. – аспирант кафедры болезней уха, горла и носа Института клинической медицины имени Н.В. Склифосовского.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9511-9212> E-mail: arturtekoev@yandex.ru

■ Аннотация

Цель – обосновать на экспериментальной физической модели безопасность применения луча лазера с длиной волны 445 нм при проведении стапедопластики.

Материал и методы. Совместно с физиками из компании ООО «Русский инженерный клуб» была создана физическая экспериментальная модель для теоретического обоснования использования хирургического лазера с длиной волны 445 нм при проведении стапедопластики на разных ее этапах.

Результаты. Исходя из расчетов, проведенных в ходе нашего исследования, мы пришли к важным выводам относительно эффектов воздействия лазерного излучения на структуры внутреннего уха в процессе стапедопластики. Было выявлено, что мощность паразитной (повреждающей) энергии излучения в 10 Вт (максимальное значение) при средней длительности импульса 0,15 с, используемой при перфорации подножной пластины стремени, не приводит к какому-либо существенному тепловому воздействию на перилимфу.

Выводы. Полученные данные служат основой для дальнейших исследований и усовершенствования лазерных технологий в области отоларингологии. В рамках нашего исследования мы предвидим необходимость проведения дополнительного гистологического анализа с учетом полученных результатов. Несмотря на обнадеживающие выводы относительно безопасности паразитного лазерного излучения в контексте теплового воздействия на перилимфу, гистологическое исследование представляет собой следующий важный этап с более глубоким пониманием структурных изменений в тканях внутреннего уха.

■ **Ключевые слова:** отосклероз; стапедопластика; синий лазер; перилимфа; стапедотомия.

■ **Конфликт интересов:** не заявлен.

Получено: 03.04.2024

Одобрено: 31.10.2024

Опубликовано: 08.11.2024

PHYSICAL JUSTIFICATION OF THE SAFETY OF USING A SURGICAL LASER WITH A WAVELENGTH OF 445NM DURING STAPEDOPLASTY

Valerii M. Svistushkin¹, Eduard V. Sinkov¹, Vasilii P. Sobolev¹, Gennadii A. Varev², Artur R. Tekoev¹

¹Sechenov First Moscow State Medical University (Sechenov University) (Moscow, Russian Federation)

²Russian Engineering Club LLC (Tula, Russian Federation)

Citation: Svistushkin VM, Sinkov EV, Sobolev VP, Varev GA, Tekoev AR. **Physical justification of the safety of using a surgical laser with a wavelength of 445 nm during stapedoplasty.** *Aspirantskiy vestnik Povolzhia.* 2024;24(2):26-31. DOI: <https://doi.org/10.35693/AVP630305>

■ Information about authors

Valerii M. Svistushkin – Dr. Sci. (Med.), Professor, Head of the Department of ear, nose and throat diseases, Institute of Clinical Medicine named after N.V. Sklifosovsky. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7414-1293> E-mail: svvm3@yandex.ru

Eduard V. Sinkov – Cand. Sci. (Med.), Associate professor of the Department of ear, nose and throat diseases, Institute of Clinical Medicine named after N.V. Sklifosovsky. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4870-5977> E-mail: 1178461@mail.ru

Vasilii P. Sobolev – Cand. Sci. (Med.), Associate professor of the Department of ear, nose and throat diseases, Institute of Clinical Medicine named after N.V. Sklifosovsky. ORCID: <https://0000-0002-7372-3299> E-mail: sobolev_v_p@staff.sechenov.ru
 Gennadii A. Varev – Cand. Sci. (Tech.), General Director. ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-0543-2477> E-mail: info@lasermed.ru
 Artur R. Tekoev – postgraduate student of the Department of ear, nose and throat diseases, Institute of Clinical Medicine named after N.V. Sklifosovsky. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9511-9212> E-mail: arturtekoev@yandex.ru

■ Abstract

Aim – to substantiate the safety of using a laser beam with a wavelength of 445 nm during stapedoplasty by means of an experimental physical model.

Material and methods. Together with physicists from the Russian Engineering Club LLC, a physical experimental model was created to theoretically substantiate the use of a surgical laser with a wavelength of 445 nm during stapedoplasty at its various stages.

Results. Based on the physical calculations carried out during our study, we came to important conclusions regarding the effect of laser radiation on the structures of the inner ear during the stapedoplasty process. It was found that even if the value of the parasitic (damaging) radiation energy is 10 W (maximum value) with an average pulse duration used for perforation of the footplate of the stirrup is 0.15 s, its effect will not lead to any significant thermal effect on the perilymph.

Conclusions. The obtained data serve as a basis for further research and improvement of laser technologies in the field of otosurgery. As part of our study, we anticipate the need for additional histological analysis based on the results obtained. Despite encouraging findings regarding the safety of parasitic laser radiation in the context of thermal exposure to perilymph, histological examination represents an important next step for a deeper understanding of structural changes in the tissues of the inner ear.

■ **Keywords:** otosclerosis; stapedoplasty; blue laser; perilymph; stapedotomy.

■ **Conflict of interest:** *nothing to disclose.*

Received: 03.04.2024

Accepted: 31.10.2024

Published: 08.11.2024

ВВЕДЕНИЕ

Стапедопластика – хирургическое вмешательство, направленное на улучшение слуха у пациентов с тимпанальной и смешанной формой отосклероза [1]. Впервые способ хирургического лечения отосклероза была представлен в конце XIX века, и с тех пор было предложено множество модификаций хирургического вмешательства [2]. Важным этапом операции является создание отверстия в основании стремени, которое традиционно осуществлялось с использованием бормашин или ручного перфоратора [3]. Однако метод прямого контакта, сопровождающийся значительной механической энергией, несет риски, такие как нейросенсорная потеря слуха [4], головокружение и паралич лицевого нерва. Для снижения этих рисков предпочтителен лазерный метод, который используется для создания отверстия в подножной пластинке стремени [2, 5]. Первый бесконтактный метод был предложен в 1980 году Перкинсом, который использовал аргоновый лазер для точного формирования отверстия в стремени [6]. Несмотря на многочисленные предложения по использованию различных длин волн лазеров для этой цели, где каждый вариант обладает уникальными особенностями, потенциальный риск развития негативных последствий для внутреннего уха по-прежнему сохраняется [7].

Риск возможных осложнений, таких как мобилизация пластинки стремени, можно снизить, отказавшись от контактного метода. Однако необходимо учитывать, что лазерная энергия может вызывать нежелательные тепловые и акустические эффекты [8, 9]. Воздействие лазерного излучения на температуру в ушном лабиринте было изучено на животных еще до полноценного внедрения лазерных технологий в отохирургию. Тепловые эффекты, вызванные лазером, стали объектом последующих исследований [10, 11].

Когда лазерное излучение взаимодействует с биожидкостями, возможны три сценария: передача, отражение

или поглощение энергии [12]. Такие свойства, как отражение и поглощение, являются основополагающими при выборе лазера в отоларингологической хирургии.

Значимым аспектом является взаимодействие лазерного излучения с перилимфой и мукопериостом подножной пластинки стремени, который подвергается перфорации лазерным лучом, что подчеркивает важность гемостаза в этом процессе, поскольку мукопериост имеет активное кровоснабжение [13–16].

Когда лазерная энергия поглощается тканью или биожидкостью, преобладающим результатом является выделение тепла [10, 17]. В зависимости от таких факторов, как средняя мощность, это тепло может коагулировать белки при низких уровнях мощности, но при более высоких уровнях может вызвать испарение или даже плавление кости [18]. Кроме того, после воздействия тепло будет рассеиваться, но динамика этого рассеивания зависит от длительности импульса, времени импульса и размера пятна луча [19–22]. Также стоит отметить кумулятивные эффекты, такие как возможное повышение температуры при использовании кратковременных импульсов, особенно в случае сокращенных интервалов между ними.

ЦЕЛЬ

Обосновать на экспериментальной физической модели безопасность применения луча лазера с длиной волны 445 нм при проведении стапедопластики.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

В клинике болезней уха, горла и носа Первого МГМУ имени И.М. Сеченова Минздрава России (Сеченовский Университет) при участии физиков из компании ООО «Русский инженерный клуб» был проведен эксперимент с перфорацией костной ткани стремечка с помощью лазерного излучения с длиной волны $\lambda=0,455$ мкм (Лазермед-10-03).

Постановка задачи. При выпаривании костной ткани (основание подножной пластинки стремени) с помощью лазерного излучения с длиной волны излучения $\lambda=0,455$ мкм важным моментом является правильный выбор параметров излучения (мощность излучения P_0 и время воздействия t_0), которые определяют энергию излучения $\Theta_0 = P_0 \cdot t_0$, необходимую для выпаривания элементарного объема костной биоткани $V_0 = \frac{\pi \cdot D_0^2}{4} \cdot h_0$,

где D_0 – диаметр лазерного пучка (принимается равным диаметру кварцевой жилы световода $D_0=0,6$ мм при контактном воздействии); h_0 – толщина косточки в направлении излучения ($h_0=0,5 \div 0,7$ мм).

Экспериментальным путем установлено, что для выпаривания элементарного объема костной биоткани объемом $V_0 = \frac{\pi \cdot D_0^2}{4} \cdot h_0 = \frac{3,14 \cdot 0,6^2 \text{ мм}^2}{4} \cdot 0,7 \text{ мм} = 0,2 \text{ мм}^3$ требуется энергия $\Theta_0 = P_0 \cdot t_0 = 10 \text{ Вт} \cdot 0,15 \text{ с} = 1,5 \text{ Дж}$.

Поскольку толщина косточки h_0 может отличаться от пациента к пациенту, то указанная энергия может также меняться. Поэтому возникает задача установки таких параметров излучения, при которых бы гарантированно выпаривался элементарный объем костной биоткани, но при этом исключалось паразитное воздействие лазерного излучения на подлежащую за косточкой жидкость (перилимфу). Перилимфа представляет собой внеклеточную жидкость, размещенную внутри внутреннего уха. Ионный состав перилимфы схож с составом плазмы и спинномозговой жидкости. Основным катионом в перилимфе является натрий, при этом концентрации натрия и калия в перилимфе составляют 138 мМ и 6,9 мМ соответственно.

Исходные данные. Проведем оценку энергетического воздействия паразитного лазерного излучения на перилимфу.

Рассмотрим упрощенную модель лазерного воздействия, представленную на рисунке 1.

Критерием недопустимого воздействия паразитного (повреждающего) лазерного излучения на подлежащую жидкость является температура ее нагрева до 42°C (начало денатурации белка).

Паразитное лазерное излучение может быть обусловлено либо неправильным выбором времени воздействия лазерного излучения t_0 (которое установлено экспериментальным путем и принимается равным 0,15 с при мощности излучения $P_0=10$ Вт), либо уменьшенной толщиной косточки.

Предположим, что при выполнении стапедопластики паразитная (повреждающая) энергия лазерного излучения Θ_n сопоставима с полезной энергией $\Theta_0 = P_0 \cdot t_0 = 10 \text{ Вт} \cdot 0,15 \text{ с} = 1,5 \text{ Дж}$, необходимой для выпаривания элементарного объема костной биоткани $V_0 = 0,2 \text{ мм}^3$.

Оценим, хватит ли такой паразитной энергии $\Theta_n = 1,5 \text{ Дж}$ для нагрева подлежащей жидкости объемом V_n до 42°C .

Энергия Θ_n , необходимая для нагрева жидкости объемом V_n с температуры $T_1=36,6^\circ\text{C}$ до $T_2=42^\circ\text{C}$, определяется из соотношения: $\Theta_n = \rho \cdot V_n \cdot c \cdot \Delta T$,

где ρ – плотность жидкости, $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ (принимается

$$\rho = 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} = 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{см}^3};$$

V_n – объем нагреваемой ткани, м^3 ;

c – удельная теплоемкость жидкости (физраствор),

$$\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{град}} \quad (c = 4,19 \cdot 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{град}}).$$

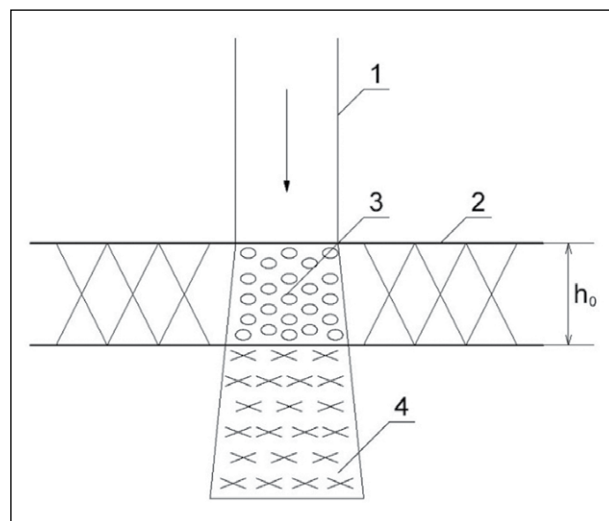


Рисунок 1. Упрощенная модель лазерного воздействия на косточку стремечка и подлежащую перилимфу: 1 – кварцевый торец световода диаметром $D_0=600$ мкм контактирует с косточкой 2; 3 – выпариваемый объем косточки V_0 (толщина h_0); 4 – объем нагреваемой паразитным излучением перилимфы V_n .

Figure 1. Simplified model of laser action on the stapes bone and the perilymph to be treated: 1 – the quartz end of the light guide with a diameter of $D_0 = 600$ mkm contacts the bone 2; 3 – the evaporated volume of the bone V_0 (thickness h_0); 4 – the volume of the perilymph heated by parasitic radiation V_n .

Объем нагреваемой жидкости V_n , в котором поглощается паразитная энергия $\Theta_n=1,5$ Дж, определяется глубиной проникновения лазерного излучения в подлежащую жидкость L_0 и расходимостью лазерного излучения 2α (рисунок 2).

Глубина проникновения паразитного лазерного излучения в подлежащую жидкость (глубина, на которой интенсивность I лазерного излучения уменьшается в $e^2=7,5$ раза) определяется из соотношения $I = I_0 \cdot e^{-m \cdot l_0}$, где m – коэффициент поглощения жидкостью лазерного излучения

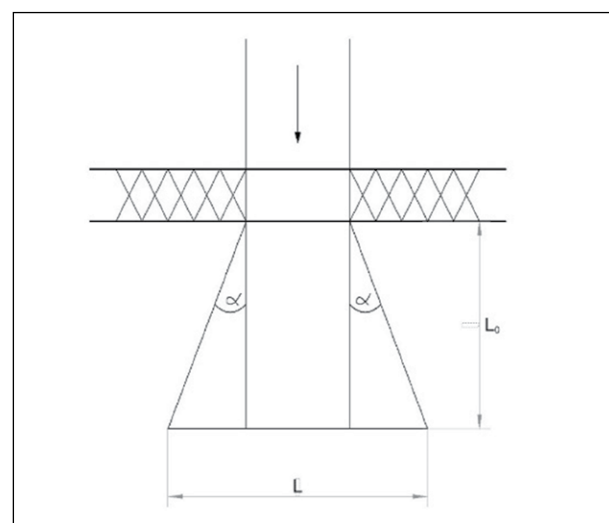


Рисунок 2. Упрощенная модель проникновения лазерного излучения в подлежащую жидкость.

Figure 2. Simplified model of laser radiation penetration into the underlying liquid.

с длиной волны $\lambda=0,455$ мкм ($m = 3 \cdot 10^{-4} \frac{1}{\text{см}}$). Тогда $L_0 \approx \frac{1}{m} = \frac{1}{3 \cdot 10^{-4}} \text{ см} = 0,33 \cdot 10^4 \text{ см} = 3,3 \cdot 10^3 \text{ см}$.

В соответствии с рисунком 2 объем $V_{\text{п}}$, в котором поглощается энергия лазерного излучения, определяется объемом конуса $V_{\text{к}}$, высотой L_0 и основанием $L=d_0+2tg\alpha \cdot L_0$ ($\alpha=15^\circ$), тогда

$$V_{\text{к}} \approx \frac{1}{3} \pi \left(\frac{L}{2}\right)^2 \cdot L_0 = 9 \cdot 10^9 \text{ см}^3.$$

Энергия, необходимая для нагрева такого объема жидкости с температуры $T_1=36,6^\circ\text{C}$ до $T_2=42^\circ\text{C}$, составит

$$\Delta = \rho \cdot V_{\text{п}} \cdot c \cdot \Delta T = 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{см}^3} \cdot 9 \cdot 10^9 \text{ см}^3 \cdot 4,19 \cdot 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{град}} \cdot 5,4 \text{ град} = 203 \cdot 10^9 \text{ Дж}.$$

Как видно, значение этой энергии на несколько порядков больше значения паразитной энергии лазерного излучения $\Delta_n=1,5$ Дж, которое может проникнуть в подлежащую жидкость.

На основании проведенных расчетов видно, что даже если значение паразитной энергии излучения будет сопоставимо с полезным значением энергии лазерного излучения $\Delta_0=1,5$ Дж, то ее воздействие не приведет к какому-либо существенному тепловому воздействию на перилимфу. Эти выводы сделаны на основании допущения, что физические свойства перилимфы (коэффициент поглощения лазерного излучения) отождествляются со свойствами физиологического раствора (NaCl 0,9%).

Рассмотрим самый неблагоприятный случай моделирования: вся паразитная лазерная энергия $\Delta_n=1,5$ Дж поглощается подлежащей перилимфой. Из геометрических размеров строения уха примем объем перилимфы равным 78 мм^3 , тогда энергия, необходимая для нагрева такого объема биоткани на $5,4^\circ\text{C}$ составит

$\Delta = 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{см}^3} \cdot 78 \cdot 10^{-3} \text{ см}^3 \cdot 4,19 \cdot 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{град}} \cdot 5,4 \text{ град} = 1,7 \text{ Дж}$ что сопоставимо со значением паразитной энергии лазерного излучения $\Delta_n=1,5$ Дж (при 100% ошибке установки значения времени воздействия t_0).

Таким образом, на основании проведенных оценочных расчетов можно сделать вывод, что паразитное лазерное излучение при выполнении стапедопластики безопасно по тепловому воздействию для подлежащей перилимфы.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Исходя из расчетов, проведенных в ходе нашего исследования, мы пришли к важным выводам относительно эффектов воздействия лазерного излучения на структуры внутреннего уха в процессе стапедопластики. Было выявлено, что мощность паразитной (повреждающей) энергии излучения в 10 Вт (максимальное значение) при средней длительности импульса 0,15 с, используемой при перфорации подножной пластины стремени, не приводит к какому-либо существенному тепловому воздействию на перилимфу. Эти заключения основаны на предположении, что физические свойства перилимфы, такие как коэффициент поглощения лазерного излучения, аналогичны свойствам физиологического раствора (NaCl 0,9%). Исходя из этого допущения, мы уверены в том, что при выполнении стапедопластики

лазерное излучение оказывает минимальное тепловое воздействие на подлежащую перилимфу.

Когда луч лазерного света взаимодействует с тканью, возможны три сценария: передача, отражение и поглощение [23–30]. В данном случае мы подтвердили, что луч «синего» лазера отражается от жидкости. Эти оценочные расчеты подтверждают безопасность лазерного излучения с длиной волны 445 нм в контексте теплового воздействия на перилимфу при выполнении стапедопластики.

ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные в ходе исследования результаты представляют собой важный вклад в понимание воздействия лазерного излучения с длиной волны 445 нм на перилимфу в контексте стапедопластики. Проанализируем основные аспекты исследования, подчеркивая их клиническую значимость и возможные перспективы применения.

Одним из ключевых выводов нашего исследования является безопасность паразитного лазерного излучения с точки зрения теплового воздействия на перилимфу в процессе стапедопластики. Даже при сопоставимых значениях энергии паразитного излучения и полезной энергии лазера не обнаружено существенного теплового воздействия на перилимфу. Этот результат подчеркивает эффективность и безопасность лазерных методов в отоларингологии с использованием «синего лазера», что является критическим аспектом.

Интересно отметить, что наше исследование также выявило отражение луча «синего» лазера от жидкости, что может быть использовано для оптимизации хирургических вмешательств. Этот аспект открывает новые перспективы в области разработки хирургических лазерных методов, учитывающих уникальные физические свойства перилимфы.

Важным фактором, влияющим на результаты, является допущение о схожести физических свойств перилимфы и физиологического раствора. Дальнейшие исследования в этом направлении могут уточнить этот аспект и расширить наше понимание взаимодействия лазерного излучения с тканью внутреннего уха.

ВЫВОДЫ

Выводы, полученные в ходе нашего исследования, служат отправной точкой для дальнейших исследований и совершенствования лазерных технологий в области отоларингологии. Прогнозируется, что дополнительный гистологический анализ, основанный на полученных результатах, будет необходим для более полного понимания процессов, происходящих в результате перфорации подножной пластины стремени лучом «синего» лазера.

Несмотря на обнадеживающие выводы относительно безопасности паразитного лазерного излучения с длиной волны 445 нм в контексте его теплового воздействия на перилимфу, гистологическое исследование представляет собой критически важный следующий этап исследования. Оно позволит более глубоко исследовать структурные изменения, происходящие в тканях внутреннего уха в результате лазерной перфорации, что в свою очередь будет

способствовать расширению наших знаний в области отоларингологии и повышению эффективности лечебных методов. Гистологический анализ позволит окончательно подтвердить отсутствие морфологических изменений, а также выявить возможные тканевые реакции на воздействие лазерного излучения. Этот подход к исследованию структурных аспектов внутреннего уха послужит дополнительным критерием безопасности и поможет выявить любые

потенциальные последствия, которые могут остаться невидимыми на уровне теплового воздействия.

Таким образом, планируемое гистологическое исследование станет важным шагом в обеспечении комплексной оценки воздействия лазерного излучения на ткани внутреннего уха. Данные последующего этапа исследования будут служить ценным дополнением к нашим текущим результатам и способствовать более глубокому пониманию безопасности лазерной стапедопластики в отохирургии.

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Krukov AI, Garov EV, Zelenkova VN, et al. The results of laser-assisted piston stapedoplasty in the patients with otosclerosis. *Russian Bulletin of Otorhinolaryngology*. 2013;78(2):17-20. [Крюков А.И., Гаров Е.В., Зеленкова В.Н., и др. Результаты поршневой стапедопластики с лазерной ассистенцией при отосклерозе. *Вестник оториноларингологии*. 2013;78(2):17-20]. URL: <https://www.mediasphera.ru/issues/vestnik-otorinolaringologii/2013/2/030042-4668201324>
2. Minovi A, Probst G, Dazert S. Aktuelle Aspekte zur chirurgischen Therapie der Otosklerose. *HNO*. 2009;57(3):273-286. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00106-009-1888-1>
3. Svistushkin VM, Sinkov EV, Stozhkova IV. Etiopathogenetic aspects of otosclerosis. *Russian Otorhinolaryngology*. 2021;20(5):68-74. [Свиштушкин В.М., Синьков Э.В., Стожкова И.В. Этиопатогенетические аспекты отосклероза. *Российская оториноларингология*. 2021;20(5):68-74]. DOI: <https://doi.org/10.18692/1810-4800-2021-5-68-74>
4. Gadyan AT, Yanov YuK, Levinina M, Anikin IA. Analysis of the results of stapedoplasty performed in a traditional way and with a laser in otosclerosis and adhesive otitis. *Russian Otorhinolaryngology*. 2008;2:216-220. (In Russ.). [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;2:216-220].
5. Pauli N, Strömbäck K, Lundman L, Dahlin-Redfors Y. Surgical technique in stapedotomy hearing outcome and complications. *Laryngoscope*. 2020;130(3):790-796. DOI: <https://doi.org/10.1002/lary.28072>
6. Kos M, Montandon P, Guyot J. Short- and long-term results of stapedotomy and stapedectomy with a Teflon-wire piston prosthesis. *Ann Otol Rhinol Laryngol*. 2001;110(10):907-11. DOI: <https://doi.org/10.1177/000348940111001003>
7. Vishnyakov VV, Svistushkin VM, Sinkov EV. The application of the modern high-energy laser technologies for the surgical treatment of the patients presenting with otosclerosis. *Russian Bulletin of Otorhinolaryngology*. 2017;1:56-58. [Вишняков В.В., Свиштушкин В.М., Синьков Э.В. Современные высокоэнергетические лазерные технологии при хирургическом лечении больных отосклерозом. *Вестник оториноларингологии*. 2017;1:56-58]. DOI: <https://doi.org/10.17116/otorino201782156-58>
8. 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: <https://doi.org/10.1097/01.mao.0000217355.96334.ba>
9. Langman A, Lindeman R. Revision stapedectomy. *Laryngoscope*. 1993;103(9):954-958. DOI: <https://doi.org/10.1288/00005537-199309000-00002>
10. Smyth G, Hassard T. Eighteen years of experience with stapedotomy, the case of small fenestra operation. *Ann Otol Rhinol Laryngol*. 1978;49:87-92. DOI: <https://doi.org/10.1177/00034894780870s301>
11. 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. *European Archives of Oto-Rhino-Laryngology*. 2021;278:9-14. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00405-020-06117-1>
12. Wegner I, Kamalski DM, Tange RA, et al. Laser versus conventional fenestration in stapedotomy for otosclerosis: a systematic review. *Laryngoscope*. 2014;124(7):1687-1693. DOI: <https://doi.org/10.1002/lary.24514>
13. Fang L, Lin H, Zhang T-Yu, Tan J. Laser versus non-laser stapedotomy in otosclerosis: A systematic review and meta-analysis. *Auris Nasus Larynx*. 2014;41(4):337-342. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.anl.2013.12.014>
14. Frenz M. Physical characteristics of various lasers used in stapes surgery. *Adv Otorhinolaryngol*. 2007;65:237-49. DOI: <https://doi.org/10.1159/000098838>
15. Young E, Mitchell-Innes A, Jindal M. Lasers in stapes surgery: a review. *The Journal of Laryngology & Otology*. 2015;129(7):627-633. DOI: <https://doi.org/doi:10.1017/s0022215115001280>
16. Casazza GC, Thomas AJ, Dewey J, et al. Variations in stapes surgery cost within a multihospital network. *Otolaryngol Head Neck Surg*. 2019;161(5):835-841. DOI: <https://doi.org/10.1177/0194599819855055>
17. Yavuz H, Caylakli F, Ozer F, Ozluoglu LN. Reliability of microdrill stapedotomy: comparison with pick stapedotomy. *Otol Neurotol*. 2007;28:998-1001. DOI: <https://doi.org/10.1097/MAO.0b013e31815a3548>
18. Svistushkin VM, Sinkov EV, Stozhkova IV. Quality of life in patients with otosclerosis. *Medical Council*. 2022;(8):126-130. [Свиштушкин В.М., Синьков Э.В., Стожкова И.В. Качество жизни пациентов с отосклерозом. *Медицинский совет*. 2022;16(8):126-130]. DOI: <https://doi.org/10.21518/2079-701X-2022-16-8-126-130>

19. 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: <https://doi.org/10.1016/j.anl.2013.12.014>
20. Vincent R, Bittermann AJN, Oates J, et al. KTP Versus CO₂ Laser Fiber Stapedotomy for Primary Otosclerosis. *Otology & Neurotology* 2012;33(6):928-933.
DOI: <https://doi.org/10.1097/MAO.0b013e31825f24ff>
21. 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 Otology*. 2011;7:283-288.
URL: <https://www.advancedotology.org/en/laser-versus-drill-assisted-stapedotomy-for-the-treatment-of-otosclerosis-a-randomized-controlled-trial-161193>
22. Shabana Y, Allam H, Pedersen C. Laser stapedotomy. *The Journal of Laryngology & Otology*. 1999;113(5):413-416.
DOI: <https://doi.org/10.1017/S0022215100144111>
23. Motta G, Moscillo L. Functional results in stapedotomy with and without CO₂ laser. *ORL J Otorhinolaryngol Relat Spec*. 2002;64(5):307-10.
DOI: <https://doi.org/10.1159/000066079>
24. 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: <https://doi.org/10.1053/ajot.2000.8380>
25. Haberkamp TJ, Harvey SA, Khafagy Y. Revision stapedectomy with and without the CO₂ laser: an analysis of results. *Am J Otol*. 1996;17(2):225-229.
URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/8723952/>
26. Jovanovic S, Schönfeld U, Hensel H, Scherer H. Clinical experiences with the CO₂ laser in revision stapes surgery. *Laser-Medizin: eine interdisziplinäre Zeitschrift: Praxis, Klinik, Forschung*. 1997;13(1):37-40.
DOI: [https://doi.org/10.1016/S0938-765X\(97\)80009-0](https://doi.org/10.1016/S0938-765X(97)80009-0)
27. Boyev KP. Use of Lasers in Otosclerosis Surgery. *Otolaryngologic Clinics of North America*. 2018;51(2):405-413.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.otc.2017.11.009>
28. 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):1099-1105.
DOI: <https://doi.org/10.1177/0194599816635132>
29. Malafronte 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):1047-1049.
DOI: <https://doi.org/10.1097/MAO.0b013e31822a1ccc>
30. Garin P, Van Prooyen-Keyser S, Jamart J. Hearing outcome following laser-assisted stapes surgery. *J Otolaryngol*. 2002;31(1):31-34.
DOI: <https://doi.org/10.2310/7070.2002.19196>

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ	ADDITIONAL INFORMATION
Этическая экспертиза. Данный эксперимент был рассмотрен и разрешен локальным этическим комитетом Московского государственного медицинского университета имени И.М. Сеченова (Сеченовский Университет) (протокол № 19-22 от 06.10.2022).	Ethical examination. This experiment was reviewed and approved by the Local Ethics Committee of the I.M. Sechenov Moscow State Medical University (Sechenov University) (Protocol No. 19-22 dated 06.10.2022).
Источник финансирования. Работа выполнена по инициативе авторов без привлечения финансирования.	Study funding. The study was the authors' initiative without external funding.
Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с содержанием настоящей статьи.	Conflict of Interest. The authors declare that there are no obvious or potential conflicts of interest associated with the content of this article.
Участие авторов. В.М. Свистушкин – дизайн исследования, научное руководство, редактирование статьи. Э.В. Синьков, В.П. Соболев, Г.А. Варев – проведение исследования, анализ и интерпретация результатов. А.Р. Текоев – анализ результатов, написание текста. Все авторы одобрили финальную версию статьи перед публикацией, выразили согласие нести ответственность за все аспекты работы, подразумевающую надлежащее изучение и решение вопросов, связанных с точностью или добросовестностью любой части работы.	Contribution of individual authors. V.M. Svistushkin – study design, scientific supervision, editing of the article. E.V. Sinkov, V.P. Sobolev, G.A. Varev – study implementation, analysis and interpretation of results. A.R. Tekoev – analysis of results, writing of the text. All authors gave their final approval of the manuscript for submission, and agreed to be accountable for all aspects of the work, implying proper study and resolution of issues related to the accuracy or integrity of any part of the work.
Автор для переписки Артур Русланович Текоев Адрес: Сеченовский Университет, ул. Трубецкая, 8, стр. 2, г. Москва, Россия, 119991. E-mail: arturtekoev@yandex.ru	Corresponding Author Artur R. Tekoev Address: Sechenov University, bld. 2, 8 Trubetskaya st., Moscow, Russia, 119991. E-mail: arturtekoev@yandex.ru