

ЗАБОЛЕВАНИЯ ЛИМФОЭПИТЕЛИАЛЬНОГО ГЛОТОЧНОГО КОЛЬЦА И ШЕИ

Научная статья

УДК 616.2-002.271-09.11-092.9-089.87:615.849.19

<https://doi.org/10.18692/1810-4800-2025-5-26-35>

Сравнительное экспериментальное исследование воздействия лазеров 445 и 980 нм на голосовые складки биологической модели

П. И. Панченко¹, А. А. Кривопапов², П. А. Шамкина³, В. В. Дворянчиков⁴,
К. Ш. Шейхаметов⁵, А. И. Глушенко⁶, Е. В. Тырнова⁷

^{1,2,3,4,5,6,7} Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт уха, горла, носа и речи,
Санкт-Петербург, 190013, Российская Федерация

² Северо-Западный государственный медицинский университет имени И. И. Мечникова,
Санкт-Петербург, 191015, Российская Федерация

¹ p.panchenko@niilor.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3380-7228>

² krivopalov@list.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6047-4924>

³ p.s.ent@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4595-365X>

⁴ v.v.dvoryanchikov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0925-7596>

⁵ sheykhmetov.k@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0002-1453-4540>

⁶ nocturne4@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5209-7869>

⁷ 7101755@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8421-0499>

Реферат. Обоснование. Хронический паралитический стеноз гортани является редкой, но клинически значимой патологией, характеризующейся стойким нарушением подвижности голосовых складок и приводящей к значительному нарушению дыхательной и голосовой функций. В связи с ростом встречаемости данной патологии сохраняется потребность в совершенствовании методов лечения, в том числе за счет применения высокотехнологичного оборудования. Внедрение и использование лазерных систем открыло возможности для щадящей резекции тканей гортани, однако оптимальный выбор длины волны лазерного излучения остается предметом исследований. **Цель.** Настоящая работа направлена на экспериментальное сравнение параметров воздействия полупроводниковых лазеров с длиной волны 445 и 980 нм на ткани гортани. **Материалы и методы.** Работа выполнена ex vivo на голосовых складках барана и in vivo на голосовых складках кроликов. Оценивались глубина, длина абляции, выраженность термического повреждения и гистологическая структура тканей после воздействия лазера. **Результаты.** Показано, что лазер с длиной волны 445 нм обеспечивает более щадящее воздействие на ткани гортани с меньшей глубиной термического повреждения по сравнению с лазером 980 нм. В свою очередь, лазер с длиной волны 980 нм обладает более высокими абляционными свойствами, но характеризуется большими термическими повреждениями по сравнению с лазером длиной волны 445 нм. **Заключение.** Полученные результаты позволяют обосновать целесообразность дифференцированного применения лазеров различного спектра излучения при хирургическом лечении пациентов с хроническими паралитическими стенозами гортани.

Ключевые слова: хронический паралитический стеноз гортани, хирургическое лечение, синий лазер, лазер с длиной волны 445 нм, лазер с длиной волны 980 нм, инфракрасный лазер

Для цитирования: Панченко П. И., Кривопапов А. А., Шамкина П. А., Дворянчиков В. В., Шейхаметов К. Ш., Глушенко А. И., Тырнова Е. В. Сравнительное экспериментальное исследование воздействия лазеров 445 и 980 нм на голосовые складки биологической модели. *Российская оториноларингология*. 2025;24(5):26–35. <https://doi.org/10.18692/1810-4800-2025-5-26-35>

Science article

Comparative experimental study of effects of 445 nm and 980 nm lasers on vocal folds of biological model**P. I. Panchenko¹, A. A. Krivopalov², P. A. Shamkina³, V. V. Dvoryanchikov⁴, K. Sh. Sheikhametov⁵, A. I. Glushenko⁶, E. V. Tyrnova⁷**^{1,2,3,4,5,6,7} Saint Petersburg Scientific Research Institute of Ear, Throat, Nose and Speech, Saint Petersburg, 190013, Russian Federation² Mechnikov Northwestern State Medical University, Saint Petersburg, 191015, Russian Federation¹ p.panchenko@niilor.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3380-7228>² krivopalov@list.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6047-4924>³ p.s.ent@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4595-365X>⁴ v.v.dvoryanchikov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0925-7596>⁵ sheykhametov.k@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0002-1453-4540>⁶ nocturne4@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5209-7869>⁷ 7101755@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8421-0499>

Abstract. Background. Chronic paralytic laryngeal stenosis is a rare but clinically significant pathology characterized by persistent impaired mobility of the vocal folds and leading to significant impairment of respiratory and vocal functions. Due to the increasing incidence of this pathology, there remains a need to improve treatment methods, including through the use of high-tech equipment. The introduction of laser systems has opened up opportunities for gentle resection of laryngeal tissues; however, the optimal choice of laser radiation wavelength remains the subject of research. **Objective.** To experimentally compare the parameters of the effects of 445 nm and 980 nm semiconductor lasers on laryngeal tissue. **Materials and methods.** The work was performed ex vivo on ram vocal folds and in vivo on rabbit vocal folds. The depth and length of ablation, the severity of thermal damage, and the histological structure of tissues after laser exposure were evaluated. **Results.** The 445 nm laser was shown to have a gentler effect on laryngeal tissues with a lower depth of thermal damage compared to the 980 nm laser. Conversely, the 980 nm laser demonstrated higher ablative properties but is characterized by greater thermal damage compared to the 445 nm laser. **Conclusion.** The results obtained make it possible to substantiate the expediency of differentiated use of lasers of different radiation spectra in the surgical treatment of patients with chronic paralytic laryngeal stenosis.

Keywords: chronic paralytic laryngeal stenosis, surgical treatment, blue laser, 445 nm laser; 980 nm laser, infrared laser

For citation: Panchenko P. I., Krivopalov A. A., Shamkina P. A., Dvoryanchikov V. V., Sheikhametov K. Sh., Glushenko A. I., Tyrnova E. V. Comparative experimental study of effects of 445 nm and 980 nm lasers on vocal folds of biological model. *Russian Otorhinolaryngology*. 2025;24(5):26-35. (In Russ.) <https://doi.org/10.18692/1810-4800-2025-5-26-35>

Введение

Хронический паралитический стеноз гортани является достаточно редким заболеванием, частота встречаемости которого составляет примерно 0,95 случая на 100 000 человек [1]. Однако значительная часть пациентов — лица трудоспособного возраста, что подчеркивает не только клиническую, но и социальную значимость данной патологии [2–4].

Несмотря на наличие перспективных направлений в лечении хронических паралитических стенозов гортани, таких как генные и стволовые технологии, методы реиннервации и разработка имплантатов для восстановления подвижности голосовых складок, данные подходы пока остаются

на стадии экспериментальных исследований или ограничены в клиническом применении в связи с технической сложностью и неоднозначностью исходов [5–7]. На сегодняшний день при лечении хронического паралитического стеноза гортани преимущественно применяются методы статического расширения голосовой щели, обеспечивающие восстановление проходимости дыхательных путей [8–10]. Применение лазерных технологий в хирургии гортани позволило повысить точность вмешательств и уменьшить зону повреждения окружающих тканей [8, 9, 11, 12]. Наиболее распространенными на протяжении последних десятилетий остаются СО₂-лазеры, эффективность которых подтверждена в различных клинических

исследованиях [9, 10]. В то же время в отечественной оториноларингологической практике широкое применение получили полупроводниковые лазеры ближнего инфракрасного спектра, в частности с длиной волны 980 нм [11, 12]. Лазеры, относящиеся к видимому спектру, такие как «синий лазер» с длиной волны 445 нм демонстрируют выраженные абляционные свойства и минимальную зону термического повреждения, что способствует меньшей воспалительной реакции и сокращению сроков заживления [12–14].

В имеющейся литературе недостаточно данных, позволяющих сравнить особенности абляционного и коагуляционного действия лазеров с длиной волны 445 и 980 нм при воздействии на ткани гортани. Это определяет актуальность проведения экспериментальной оценки характера тканевого воздействия и степени термических изменений при использовании лазерных систем с различной длиной волны.

Цель исследования

Оценить морфологические различия абляционного и термического действия лазеров с длиной волны 445 и 980 нм на ткани гортани в условиях экспериментальной модели.

Материалы и методы

Исследование проводилось на базе ФГБУ «Санкт-Петербургский НИИ уха, горла, носа и речи» Минздрава России. Работа была одобрена локальным этическим комитетом (протокол № 1 от 20.01.2023 г.).

Экспериментальная работа проводилась с использованием биологических моделей, приближенные к тканям гортани человека, — голосовых складок гортани барана (*ex vivo*) и голосовых складок лабораторного кролика (*in vivo*). В эксперименте были использованы два хирургических диодных лазера — лазер с длиной волны 445 нм (TruBlue, A.R.C. Laser, Германия) и лазер с длиной волны 980 нм (АЛПХ-01 «Диолан» НПП «ВОЛО», Россия).

Методика подготовки проб и лазерной абляции

Эксперимент на гортанях баранов: гортани баранов изымались у здоровых животных сразу после забоя и доставлялись охлажденные в лабораторию, после чего в течение четырех часов после забора материала проводился эксперимент. Перед проведением лазерной абляции с поверхности исследуемого материала водой смывались все биологические жидкости. На каждой голосовой складке барана выполнялись два продольных разреза лазером, длиной 3 мм каждый, с интервалом >0,5 см между разрезами (рис. 1). Световод устанавливался перпендикулярно к поверхности складки в контактном режиме; длина разреза формировалась путем продвижения световода вдоль

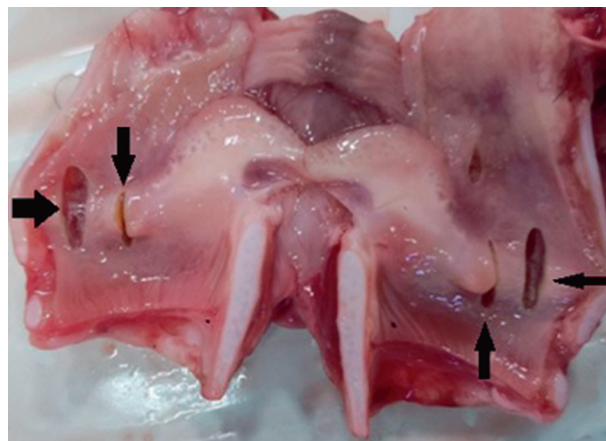


Рис. 1. Места выполнения разрезов на голосовых складках баранов (разрезы, указаны черными стрелками)

Fig. 1. Locations of incisions on ram vocal folds (incisions indicated by black arrows)

складки со скоростью 1 мм/с в течение 3 с. Для объективизации данных использовали линейку и секундомер. После абляции размеченные участки голосовых складок иссекались холодным инструментом, пробы фиксировались в индивидуальных контейнерах с нейтральным 10% забуференным формалином.

Эксперимент на лабораторных кроликах осуществлялся под общей анестезией (золетил 15 мг/кг и ксилазин 5 мг/кг в/м). При помощи прямой ларингоскопии ларингоскопом Kleinsasser Karl Storz 8590 F визуализировался голосовой отдел гортани (рис. 2), после чего через ларингоскоп вводился световод и устанавливался перпендикулярно к верхней поверхности правой голосовой складки. С помощью лазера в контактном режиме выполнялся контактный разрез по всей толще складки до ее нижнего края в течение 3 секунд. Ход процедуры фиксировался с помощью эндоскопической видеосистемы (Tele Pack X, Karl

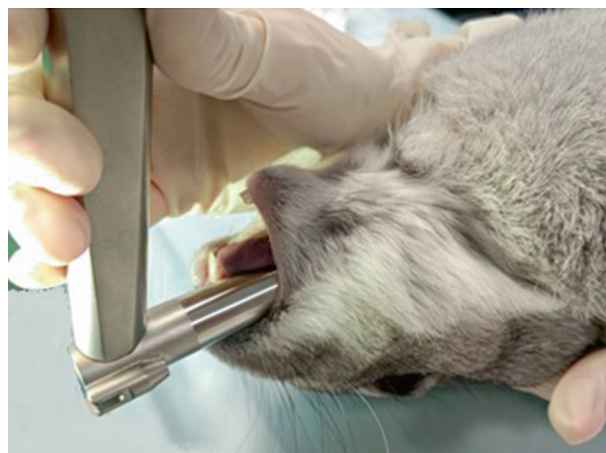


Рис. 2. Прямая ларингоскопия лабораторного кролика, вид снаружи

Fig. 2. Direct laryngoscopy of a laboratory rabbit, external view

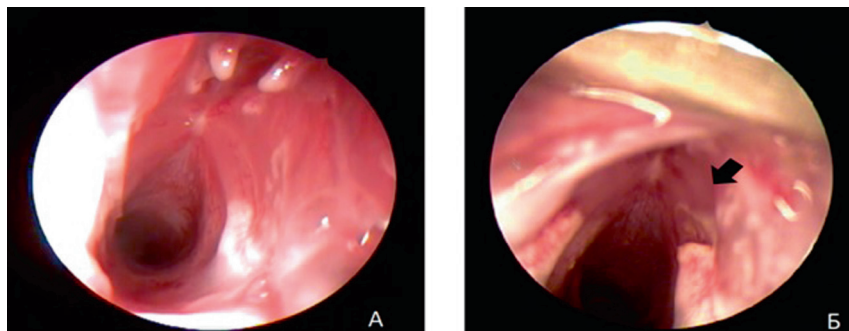


Рис. 3. Эндоларингеальная картина гортани лабораторного кролика: А — до выполнения разреза; Б — после выполнения разреза
Fig. 3. Endolaryngeal image of a laboratory rabbit: A — before the incision; B — after the incision

Storz) (рис. 3). После завершения эксперимента кролик выводился из эксперимента, гортань извлекалась через разрез на передней поверхности шеи, голосовые складки иссекались холодными инструментами и фиксировались в формалине.

Режимы лазерного воздействия

1-й этап. На голосовых складках баранов исследовали различные импульсные режимы обоих лазеров с целью определить параметры, обеспечивающие максимальную абляцию при минимальном термическом повреждении. Для каждого исследуемого режима осуществлялось 4 разреза в течение $3 \pm 0,5$ с.

Для лазера 445 и 980 нм изучаемые режимы отображены в табл. 1. Всего на баранах протестировано 25 режимов (21 — для 445 нм, 4 — для 980 нм) и выполнено 100 разрезов.

2-й этап. На основании полученных данных на 1-м этапе были выбраны оптимальные параметры для каждого лазера, которые проверялись на живой биологической модели (лабораторные

кролики). Указанные режимы в табл. 2 — согласно предварительным данным — обеспечивают наилучшее сочетание абляции и минимальное термическое повреждение.

На голосовых складках кроликов выполняли по 4 разреза каждым из выбранных режимов (всего 8 разрезов, по одному на складке).

Изъятые образцы голосовых складок фиксировали в 10% нейтральном формалине не менее 24 часов. Далее стандартным методом проводили обезживание образцов и заливку в парафин. Получившиеся на ротационном микротоме срезы толщиной 2–3 мкм депарафинировали и окрашивали гематоксилином и эозином по общепринятой методике. Микроскопическое исследование проводилось с помощью микроскопа Axio Lab. A1 (Carl Zeiss) при увеличениях $\times 40$, $\times 100$, $\times 200$, $\times 400$. Для документирования препараты сканировали на цифровом сканере Pannoramic MIDI (3DHitech) с сохранением изображений в архив. Морфометрический анализ выполнялся в про-

Таблица 1

Режимы, оцениваемые в ходе 1-го этапа эксперимента. Биологическая модель — голосовые складки гортани баранов

Modes evaluated during Stage 1 of the experiment. Biological model — vocal folds of the ram larynx

Table 1

Диодный лазер с длиной волны, нм	Импульсная мощность, Вт	Длительность импульса, мс	Длительность интервала между импульсами, мс
445	6, 7, 8, 9, 10	5, 10	100, 130, 150
980	17, 24	10, 30	50

Таблица 2

Режимы, оцениваемые в ходе 2-го этапа эксперимента. Биологическая модель — голосовые складки лабораторного кролика

Modes evaluated during Stage 2 of the experiment. Biological model — vocal folds of a laboratory rabbit

Table 2

Диодный лазер с длиной волны, нм	Импульсная мощность, Вт	Длительность импульса, мс	Длительность интервала между импульсами, мс
445	10	10	100
980	24	30	50

грамме Pannoramic Viewer 1.15.4. Производились измерения зон лазерного воздействия: глубина и длина абляции и толщина (ширина) зоны термического повреждения окружающих тканей. Измерения каждой зоны проводили в 6 различных точках с последующим расчетом среднего значения и стандартного отклонения.

Для определения соотношения между зонами абляции и термического повреждения рассчитывался коэффициент эффективности разреза k — интегральный показатель, отражающий соотношение объема абляции и термического повреждения:

$$k = Sp / (Sa + St) Sd = (SaSd) / (Sa + St) Sd,$$

где Sp — средняя площадь физического повреждения; Sa — средняя глубина абляции; St — среднее термическое повреждение; Sd — средняя длина разреза.

Значения $k > 0,6$ считались положительными (эффективный разрез), что соответствует не менее 60% вклада абляции и не более 40% — термического некроза; при значении $k < 0,6$ эффективность разреза признавалась неудовлетворительной.

Результаты

При гистологическом исследовании разрезов отчетливо визуализировались две зоны повреждения: центральная зона абляции (полная деструкция ткани, соответствующая профилю разреза) и окружающая зона термического повреждения прилежащих тканей. Для каждого разреза определялись длина и глубина зоны абляции, а также толщина зоны термического повреждения.

Гистологическая картина соответствовала типичной для лазерного воздействия: в зоне абляции наблюдалось испарение ткани с образованием полости разреза, по периметру которой располагалась полоса термического повреждения без сохранения клеточной структуры (рис. 4).

Толщина этой зоны термического повреждения зависела от параметров и длины волны лазера.

Результаты 1-го этапа. Все протестированные режимы с использованием лазера с длиной волны 445 нм демонстрировали удовлетворительную зону абляции (табл. 3–5).

Согласно полученным в ходе эксперимента данным (табл. 3–5) можно сделать заключение, что увеличение импульсной мощности, продолжительности импульса до 10 мс и сокращение длительности интервала между импульсами до 100 мс приводило к наиболее высоким значениям коэффициента эффективности разреза. Это указывает на то, что зона абляции увеличивается, но при этом не происходит выраженного нарастания зоны термического повреждения. Для лазера с длиной волны 445 нм наибольший коэффициент эффективности разреза отмечен при режиме: импульсная мощность 10 Вт, длительность импульса 10 мс, длительность интервала между импульсами 100 мс — в этом случае k равен 0,79, что свидетельствует о его более высокой эффективности по сравнению с другими режимами (табл. 3).

Лазер с длиной волны 980 нм в экспериментах *ex vivo* во всех протестированных режимах продемонстрировал более выраженный абляционный эффект — глубина и длина разрезов были больше, чем у 445 нм, однако зоны термического повреждения были значительно шире. Из четырех режимов 980 нм только один — при параметрах импульсной мощности 24 Вт, длительности импульса 30 мс, длительности интервала между импульсами 50 мс — позволил достичь приемлемого соотношения абляции и термического повреждения ($k = 0,66 > 0,6$) (табл. 6).

Статистический анализ результатов экспериментов *ex vivo* подтвердил достоверное влияние параметров импульса на глубину абляции и ширину термического повреждения для обоих лазеров: для 445 нм различия между группами режимов были значимы по критерию Крускала—Уоллиса,

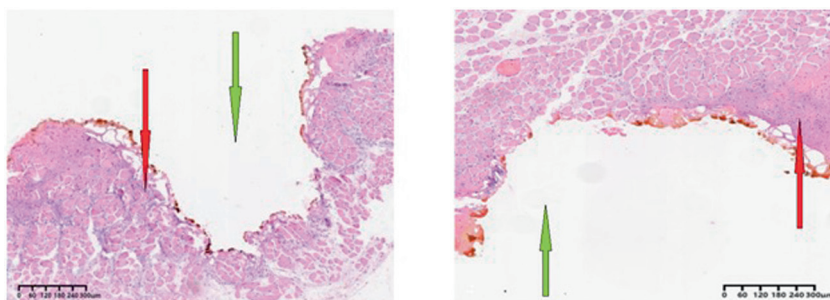


Рис. 4. Микропрепараты голосовых складок кролика после воздействия 445 нм, мощность 10 Вт, длительность импульса 10 мс, длительность интервала между импульсами 100 мс. Зеленые стрелки — зоны деструкции; красные стрелки — зоны термического повреждения. (Окраска гематоксилином и эозином)

Fig. 4. Microscope slides of rabbit vocal folds after exposure to 445 nm, 10 W power, 10 ms pulse duration, and 100 ms interval between pulses. Green arrows indicate destruction zones; red arrows indicate thermal damage zones (Hematoxylin and eosin staining)

Таблица 3

Результаты изучаемых зон на препаратах гортани баранов при лазерном воздействии длиной волны 445 нм при длительности интервала между импульсами 100 мс.
Длительность интервала между импульсами 100 мс

Table 3

Results of the studied zones on ram laryngeal specimens exposed to 445 nm laser radiation with an interpulse interval of 100 ms. 445 nm laser with an interpulse interval duration of 100 ms

Импульсная мощность, Вт	Длительность импульса, мс	Глубина / длина абляции, мкм	Зона термического повреждения	k
6	10	242±106/145±25	121±26	0,65
7	10	445±194/248±30	163±55	0,71
8	5	148±78/ 364±43	94±43	0,61
	10	334±248/ 425±260	97±40	0,72
9	5	129±58/ 462±147	54±28	0,71
	10	265±82/ 504±260	88±31	0,75
10	5	249±137/ 357±121	84±39	0,73
	10	508±245/336±172	126±60	0,79

Таблица 4

Результаты изучаемых зон на препаратах гортани баранов при лазерном воздействии длиной волны 445 нм при длительности интервала между импульсами 130 мс.
Длительность интервала между импульсами 130 мс

Table 4

Results of the studied zones on ram laryngeal specimens exposed to 445 nm laser radiation with an interpulse interval of 130 ms. 445 nm laser with an interpulse interval duration of 130 ms

Импульсная мощность, Вт	Длительность импульса, мс	Глубина / длина абляции, мкм	Зона термического повреждения	k
6	10	254±124/183±37	138±53	0,63
7	10	265±125/213±78	134±69	0,64
8	5	57±28/497±153	96±77	0,41
	10	206±95/470±84	122±71	0,64
9	5	78±46/630±258	77±43	0,50
	10	191±114/590±124	106±46	0,62
10	5	293±35/544±75	84±38	0,60
	10	283±65/469±72	102±30	0,64

Таблица 5

Результаты изучаемых зон на препаратах гортани баранов при лазерном воздействии длиной волны 445 нм при длительности интервала между импульсами 150 мс.
Длительность интервала между импульсами 150 мс

Table 5

Results of the studied zones on ram laryngeal specimens exposed to 445 nm laser radiation with an interpulse interval of 150 ms. 445 nm laser with an interpulse interval duration of 150 ms

Импульсная мощность, Вт	Длительность импульса, мс	Глубина / длина абляции, мкм	Зона термического повреждения	k
8	5	52±22/463±53	141±25	0,27
9	5	99±61/395±159	103±32	0,49
	10	275±110/524±265	120±34	0,55
10	5	136±47/456±168	123±37	0,52
	10	225±79/414±199	185±75	0,55

Таблица 6

Результаты изучаемых зон на препаратах гортани баранов при лазерном воздействии длиной волны 980 нм. Длительность интервала между импульсами 50 мс

Table 6

Results of the studied areas on ram laryngeal specimens exposed to 980 nm laser radiation. 980 nm laser with an interpulse interval duration of 50 ms

Импульсная мощность, Вт	Длительность импульса, мс	Глубина / длина абляции, мкм	Зона термического повреждения	k
17	10	445±218/1477±1002	277±78	0,44
	30	518±341/1456±1021	217±104	0,48
24	10	806±453/1399±680	260±82	0,53
	30	673±244/1338±1007	193±165	0,66

$p < 0,001$; для 980 нм — значимы по критерию Манна—Уитни, $p = 0,026$.

Наиболее наглядно различия в эффективности режимов воздействия демонстрируются на рис. 5, отражающем значения коэффициента эффективности разреза k для различных параметров излучения. Среди исследованных режимов лазера с длиной волны 445 нм наиболее эффективным оказалось сочетание длительности импульса 10 мс, длительности интервала между импульсами 100 мс и импульсной мощности 10 Вт. Лазер с длиной волны 980 нм продемонстрировал более выраженный абляционный эффект по сравнению с лазером 445 нм во всех протестированных режимах. Однако ширина зоны термического повреждения при этом оказалась значительно больше, что ограничивает применимость большинства параметров в клинической практике. Приемлемое соотношение глубины абляции и выраженности термического воздействия для 980 нм было достигнуто лишь в одном из режимов, что указывает на узкое окно оптимальных параметров при использовании данного типа лазера.

Результаты 2-го этапа. На втором этапе исследовали один наиболее эффективный режим для каждого сравниваемого лазера на голосовых складках живой биологической модели. Лазер с длиной волны 445 нм при параметрах импульсной мощности 10 Вт, длительности импульса 10 мс, длительности интервала между импульсами 100 мс сформировал в тканях кролика разрез средней глубиной 397 ± 167 мкм при средней длине ~ 1140 мкм; зона термического повреждения составила 88 ± 19 мкм, при этом коэффициент эффективности $k = 0,78$. Лазер с длиной волны 980 нм при настройках импульсной мощности 24 Вт, длительности импульса 30 мс, длительности интервала между импульсами 50 мс обеспечил сходную глубину абляции (422 ± 132 мкм) при длине ~ 1200 мкм, однако ширина зоны термического повреждения была в несколько раз больше — 258 ± 87 мкм, $k = 0,62$ (табл. 7).

Таким образом, в живых тканях лазер с длиной волны 445 нм подтвердил свое преимущество: при сопоставимой глубине резекции объем термического повреждения вокруг разреза был

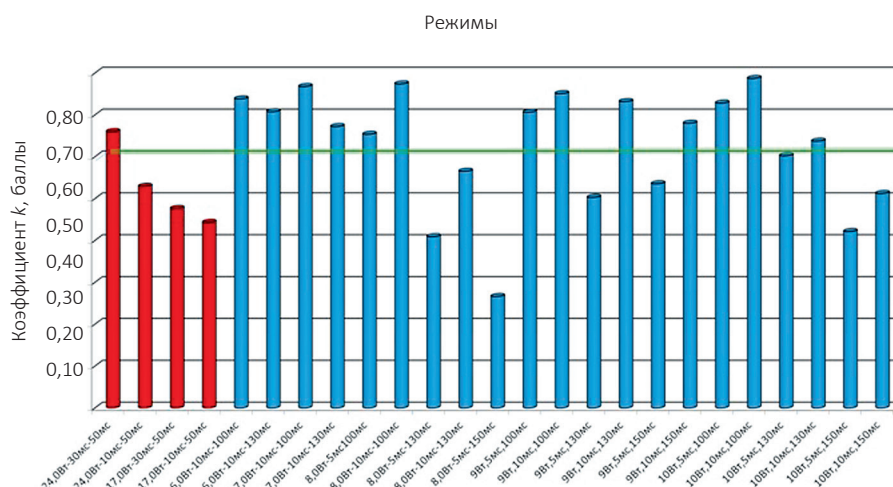


Рис. 5. Коэффициент эффективности разреза для лазера с длиной волны 980 нм (красные столбцы) и 445 нм (синие столбцы). Зеленая линия — коэффициент $k = 0,6$

Fig. 5. Incision efficiency coefficient for 980 nm laser (red bars) and 445 nm laser (blue bars). Green line: coefficient $k = 0.6$

Таблица 7

Морфометрические показатели разрезов на живой биологической модели для оптимальных режимов лазеров с длиной волны 445 и 980 нм

Table 7

Morphometric parameters of incisions in a living biological model for optimal laser modes with wavelengths of 445 and 980 nm

Параметр	445 нм	980 нм
Импульсная мощность, Вт	10	24
Длительность импульса, мс	10	30
Длительность интервала между импульсами, мс	100	50
Глубина/длина абляции, мкм	397±167/1142±240	422±132/1204±428
Зона термического повреждения, мкм	88±19	258±87
<i>k</i>	0,78	0,62

существенно меньше, чем при воздействии лазера с длиной волны 980 нм. Коэффициенты эффективности разреза тестируемых режимов на живой биологической модели были в обоих случаях положительными ($k > 0,6$), однако у 445 нм разрез был наиболее оптимальным, в то время как у 980 нм показатель лишь немного превышал порог эффективности.

При сравнении результатов *in vivo* с данными *ex vivo* было выявлено, что для лазера 445 нм на живой модели глубина абляции была статистически значимо больше, а зона термического некроза достоверно меньше, чем на изолированных тканях (оба различия $p < 0,05$). Для лазера 980 нм наличие кровотока существенно повлияло на степень термического повреждения: в *in vivo* условиях зона термического повреждения оказалась достоверно шире, чем *ex vivo*. Коэффициент эффективности разреза k в выбранных режимах при переходе от неживой к живой модели существенно не изменился, $p > 0,05$, оставаясь $> 0,6$ в обоих случаях. Этот факт говорит о том, что, несмотря на увеличение термического повреждения в условиях кровоснабжения, соотношение абляции и коагуляции для оптимальных режимов сохраняется на приемлемом уровне. При использовании лазера с длиной волны 445 нм достигается практически равная с лазером с длиной волны 980 нм глубина резекции при значительно меньшей ширине зоны термического некроза ($p < 0,05$). Статистически значимые различия между показателями двух групп подтверждены критериями Манна—Уитни. Полученные результаты легли в основу разработки

оптимальной методики применения лазера при хроническом паралистическом стенозе гортани [16].

Выводы

Морфологическая оценка применения лазеров в данной экспериментальной работе показала следующие результаты: лазер с длиной волны 445 нм в импульсном режиме с импульсной мощностью 10 Вт, длительностью импульса 10 мс, длительностью интервала между импульсами 100 мс обеспечивает наиболее эффективное разрезание тканей гортани с минимальным термическим повреждением, тогда как для лазера 980 нм для достижения сопоставимого результата требуются значительно более высокая мощность и длительность импульса (импульсная мощность 24 Вт, длительность импульса 30 мс, длительность интервала между импульсами 50 мс). Полученные данные свидетельствуют, что применение лазера с длиной волны 445 нм позволяет получить узкую зону термического повреждения при достаточной абляции, что ведет к более быстрому заживлению раны и уменьшению сроков реабилитации пациента, в то время как воздействие лазера с длиной волны 980 нм вызывает более обширное термическое повреждение ткани, что отражается более выраженной воспалительной реакцией в послеоперационном периоде.

Таким образом, результаты представленной экспериментальной работы доказывают высокий профиль безопасности лазера с длиной волны 445 нм и его клиническую эффективность в лечении хронического паралистического стеноза гортани.

ЛИТЕРАТУРА/REFERENCES

1. Djugai S, Boeger D, Buentzel J. Chronic vocal cord palsy in Thuringia, Germany: a population-based study on epidemiology and outcome. *Eur Arch Otorhinolaryngol*. 2014;271(2):329-335. <https://doi.org/10.1007/s00405-013-2655-1>
2. Брайко И. И., Кривопапов А. А., Шамкина П. А. Распространенность, этиология, клиника и дифференциальная диагностика хронических паралистических стенозов гортани. *Российская оториноларингология*. 2019;18(6):88-96. <https://doi.org/10.18692/1810-4800-2019-6-88-96>
Braiko I. I., Krivopalov A. A., Shamkina P. A. Prevalence, etiology, clinical picture and differential diagnostics of chronic paralytic laryngeal stenosis. *Rossiiskaya otorinolaringologiya*. 2019;18(6):88-96. (In Russ.) <https://doi.org/10.18692/1810-4800-2019-6-88-96>

3. Степанова Ю. Е., Готовяхина Т. В. Алгоритм обследования пациентов с односторонним парезом гортани неясной этиологии в практике врача-оториноларинголога. *Consilium Medicum*. 2017;19 (11.1. Болезни органов дыхания):37–40.
Stepanova Yu. E., Gotovyakhina T. V. The algorithm of examination for patients with unknown etiology unilateral vocal fold paresis in ENT practice. *Consilium Medicum*. 2017;19 (11.1. Respiratory Organs Diseases):37–40. (In Russ.) https://doi.org/10.26442/2075-1753_19.11.1.37-40
4. Francis DO, Pearce EC, Ni S, Garrett CG, Penson DF. Epidemiology of vocal fold paralyses after total thyroidectomy for well-differentiated thyroid cancer in a Medicare population. *Otolaryngol. Head Neck Surg*. 2014;150(4):548–557. <https://doi.org/10.1177/0194599814521381>
5. Marina MB, Marie JP, Birchall MA. Laryngeal reinnervation for bilateral vocal fold paralysis. *Curr Opin Otolaryngol Head Neck Surg*. 2011;19(6):434–438. <https://doi.org/10.1097/MOO.0b013e32834c7d30>
6. Marie J, Bon Mardion N, Moerman M, Malard O. Réinnervation laryngée sélective des paralysies bilatérales : une technique applicable à la réhabilitation fonctionnelle d'un larynx transplanté. *Annales françaises d'Oto-rhino-laryngologie et de Pathologie Cervico-faciale*. 2014;131(4):480–485. <https://doi.org/10.1016/j.aforl.2014.07.134>
7. Li Y, Garrett G, Zeale D. Current Treatment Options for Bilateral Vocal Fold Paralysis: A State-of-the-Art Review. *Clin Exp Otorhinolaryngol*. 2017;10(3):203–212. <https://doi.org/10.21053/ceo.2017.00199>
8. Плужников М. С., Рябова М. А., Карпищенко С. А., Ермаков В. Н. Лазерная хирургия рубцовых стенозов гортани. *Вестник оториноларингологии*. 2003;1:4–8. <https://www.mediasphera.ru/issues/vestnik-otorinolaringologii/2003/1/>
Pluzhnikov M. S., Ryabova M. A., Karpishchenko S. A., Ermakov V. N. Laser surgery of cicatricial laryngostenosis. *Russian Bulletin of Otorhinolaryngology*. 2003;1:4–8. <https://www.mediasphera.ru/issues/vestnik-otorinolaringologii/2003/1/>
9. Хоранова М. Ю., Нажмудинов И. И., Гарашченко Т. И., Вавин В. В., Михалевская И. А., Гусейнов И. Г., Давудов Х. Ш., Абдуллаев Б. З., Давудова Б. Х., Магомедова К. М. Результаты хирургического лечения с использованием СО₂-лазера у больных с двусторонним параличом гортани. *Российская оториноларингология*. 2022;21(1):66–73.
Khoranova M. Yu., Nazhmudinov I. I., Garashchenko T. I., Vavin V. V., Mikhalevskaya I. A., Guseinov I. G., Davudov Kh. Sh., Abdullaev B. Z., Davudova B. Kh., Magomedova K. M. Results of surgical CO₂-laser treatment in patients with bilateral paralysis of larynx. *Rossiiskaya otorinolaringologiya*. 2022;21(1):66–73. (In Russ.) <https://doi.org/10.18692/1810-4800-2022-1-66-73>
10. Yilmaz T, Altuntaş OM., Suslu N, Atay G, Özer S, Kuşçu O, Sözen T. Total and Partial Laser Arytenoidectomy for Bilateral Vocal Fold Paralysis. *BioMed Research International*. 2016;20(16):1–7. <https://doi.org/10.1155/2016/3601612>
11. Плужников М. С., Рябова М. А., Карпищенко С. А. Хронические стенозы гортани. СПб.: Эскулап, 2004. 208 с.
Pluzhnikov M. S., Ryabova M. A., Karpishchenko S. A. Chronic stenosis of the larynx. Saint Petersburg: Eskulap, 2004. 208 p. (In Russ.)
12. Карпищенко С. А., Рябова М. А., Улупов М. Ю., Малкова М. Е., Степанова В. А. Лазерная хордаритеноидотомия при паралитических стенозах гортани. *Head and neck. Голова и шея. Российский журнал*. 2024;12(1):16–21.
Karpishchenko S. A., Ryabova M. A., Ulupov M. Yu., Malkova M. E., Stepanova V. A. Experience of contact laser surgery in paralytic laryngeal stenosis. *Head and neck. Russian Journal*. 2024;12(1):16–21. (In Russ.) <https://doi.org/10.25792/HN.2024.12.1.16-21>
13. Hess MM, Fleischer S, Ernstberger M. New 445 nm blue laser for laryngeal surgery combines photoangiolytic and cutting properties. *Eur Arch Otorhinolaryngol*. 2018;275(6):1557–1567. <https://doi.org/10.1007/s00405-018-4974-8>
14. Кривопапов А. А., Шамкина П. А., Ильина В. А., Козырева Е. Е., Панченко П. И. Применение лазера с длиной волны 445 нм в хирургии гортани: экспериментальное исследование. *Российская оториноларингология*. 2022;21(5):47–54.
Krivopalov A. A., Shamkina P. A., Il'ina V. A., Kozyreva E. E., Panchenko P. I. Use of 445 nm laser in laryngeal surgery: experimental study. *Rossiiskaya otorinolaringologiya*. 2022;21(5):47–54. (In Russ.) <https://doi.org/10.18692/1810-4800-2022-5-47-54>
15. Hanke A, Fimmers R, Frentzen M, Meister J. Quantitative determination of cut efficiency during soft tissue surgery using diode lasers in the wavelength range between 400 and 1500 nm. *Lasers Med Sci*. 2021;36(8):1633–1647. <https://doi.org/10.1007/s10103-020-03243-4>
16. Панченко П. И., Кривопапов А. А., Шамкина П. А., Мазеина Е. С. Новый подход в лечении хронического двустороннего паралитического стеноза гортани. *Consilium Medicum*. 2022;24(9):651–654.
Panchenko P. I., Krivopalov A. A., Shamkina P. A., Mazeina E. S. A new approach in the treatment of chronic bilateral paralytic stenosis of the larynx: A review. *Consilium Medicum*. 2022;24(9):651–654. (In Russ.) <https://doi.org/10.26442/20751753.2022.9.201909>

Вклад авторов

Концепция и дизайн исследования — В. В. Дворянчиков, А. А. Кривопапов

Сбор и обработка материала, статистическая обработка — П. И. Панченко, П. А. Шамкина, К. Ш. Шейхаметов, А. И. Глушенко, Е. В. Тырнова

Написание текста — П. И. Панченко, К. Ш. Шейхаметов

Редактирование — П. А. Шамкина, П. И. Панченко, Е. В. Тырнова

Contribution of authors

The concept and design of the study — V. V. Dvoryanchikov, A. A. Krivopalov

Collection and processing of material, statistical processing — P. I. Panchenko, P. A. Shamkina, K. Sh. Sheikhametov, A. I. Glushchenko,

E. V. Tyrnova

Writing by — P. I. Panchenko, K. S. Sheikhametov

Editing by — P. A. Shamkina, P. I. Panchenko, E. V. Tyrnova

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: the authors declare no conflict of interest.

Информация об авторах

Панченко Павел Игоревич — младший научный сотрудник научно-исследовательского отдела патологии верхних дыхательных путей, Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт уха, горла, носа и речи (190013, Российская Федерация, Санкт-Петербург, Бронницкая ул., д. 9); p.panchenko@niilor.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3380-7228>

Кривопапов Александр Александрович — доктор медицинских наук, руководитель научно-исследовательского отдела патологии верхних дыхательных путей, Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт уха, горла, носа и речи (190013, Российская Федерация, Санкт-Петербург, Бронницкая ул., д. 9); доцент кафедры оториноларингологии, Северо-Западный государственный медицинский университет имени И. И. Мечникова (191015, Российская Федерация, Санкт-Петербург, Кирочная ул., д. 41); krivopalov@list.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6047-4924>

Шамкина Полина Александровна — кандидат медицинских наук, научный сотрудник научно-исследовательского отдела патологии верхних дыхательных путей, Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт уха, горла, носа и речи (190013, Российская Федерация, Санкт-Петербург, Бронницкая ул., д. 9); p.s.ent@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4595-365X>

Дворяничков Владимир Владимирович — доктор медицинских наук, профессор, заслуженный врач России, директор, Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт уха, горла, носа и речи (190013, Российская Федерация, Санкт-Петербург, Бронницкая ул., д. 9); v.v.dvoryanchikov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0925-7596>

Шейхаметов Кемал Шевкетович — клинический ординатор, Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт уха, горла, носа и речи (190013, Российская Федерация, Санкт-Петербург, Бронницкая ул., д. 9); sheykhametov.k@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0002-1453-4540>

Глуценко Александра Ивановна — аспирант научно-исследовательского отдела патологии верхних дыхательных путей, Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт уха, горла, носа и речи (190013, Российская Федерация, Санкт-Петербург, Бронницкая ул., д. 9); postugne4@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5209-7869>

Тырнова Елена Валентиновна — кандидат медицинских наук, старший научный сотрудник, научно-исследовательский отдел лабораторно-диагностический, Санкт-Петербургский НИИ уха, горла, носа и речи (190013, Российская Федерация, Санкт-Петербург, Бронницкая ул., д. 9); 7101755@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8421-0499>

Information about authors

Pavel I. Panchenko — Junior Researcher of the Department of Upper Respiratory Tract Pathology, Saint Petersburg Research Institute of Ear, Throat, Nose and Speech (9, Bronnitskaya str., Saint Petersburg, Russian Federation, 190013); p.panchenko@niilor.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4595-365X>

Aleksandr A. Krivopalov — Doctor of Sciences (Med.), Head of the Research Department of Upper Respiratory Pathology, Saint Petersburg Research Institute of Ear, Throat, Nose and Speech (9, Bronnitskaya str., Saint Petersburg, Russian Federation, 190013); Docent of the Department of ORL Diseases, Mechnikov North-Western State Medical University (9, Kirochnaia str., Saint Petersburg, Russian Federation, 191015); krivopalov@list.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6047-4924>

Polina A. Shamkina — Candidate of Sciences (Med.), Researcher, Research Department of Upper Respiratory Tract Pathology, Saint Petersburg Research Institute of Ear, Throat, Nose and Speech (9, Bronnitskaya str., Saint Petersburg, Russian Federation, 190013); p.s.ent@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4595-365X>

Vladimir V. Dvoryanchikov — Doctor of Sciences (Med.), Professor, Director, Saint Petersburg Research Institute of Ear, Throat, Nose and Speech (9, Bronnitskaya str., Saint Petersburg, Russian Federation, 190013); v.v.dvoryanchikov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0925-7596>

Kemal Sh. Sheikhametov — Resident, Saint Petersburg Research Institute of Ear, Throat, Nose and Speech (9, Bronnitskaya str., Saint Petersburg, Russian Federation, 190013); sheykhametov.k@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0002-1453-4540>

Aleksandra I. Glushchenko — Graduate Student of the Department of the Research Department of Pathology of the Upper Respiratory Tract, Saint Petersburg Research Institute of Ear, Throat, Nose and Speech (9, Bronnitskaya str., Saint Petersburg, Russian Federation, 190013); nocturne4@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5209-7869>

Elena V. Tyrnova — Candidate of Sciences (Med.), Senior Research Associate, Department of Laboratory diagnostic, Saint Petersburg Research Institute of Ear, Throat, Nose and Speech (9, Bronnitskaya str., Saint Petersburg, Russian Federation, 190013); 7101755@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8421-0499>

Поступила / Received 29.01.2025

Поступила после рецензирования / Revised 25.07.2025

Принята в печать / Accepted 02.09.2025