

*На правах рукописи*



**Сурин Владимир Владимирович**

**Лазерная хирургия повреждений суставного хряща  
коленного сустава**

3.1.8. Травматология и ортопедия

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата медицинских наук

Москва – 2026

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования Первый Московский государственный медицинский университет имени И.М. Сеченова Министерства здравоохранения Российской Федерации (Сеченовский Университет)

**Научный руководитель:**

доктор медицинских наук, профессор

**Лычагин Алексей Владимирович**

**Официальные оппоненты:**

**Лазишвили Гурам Давидович** – доктор медицинских наук, профессор, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский национальный исследовательский медицинский университет имени Н.И. Пирогова» Министерства здравоохранения Российской Федерации, Институт хирургии, кафедра травматологии, ортопедии и военно-полевой хирургии, профессор кафедры

**Лазко Федор Леонидович** – доктор медицинских наук, профессор, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы», Медицинский институт, кафедра травматологии и ортопедии, профессор кафедры

**Ведущая организация:** Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский университет медицины» Министерства здравоохранения Российской Федерации

Защита диссертации состоится «18» мая 2026 г. в 13:00 часов на заседании диссертационного совета ДСУ 208.001.26 при ФГАОУ ВО Первый МГМУ им. И.М. Сеченова Минздрава России (Сеченовский Университет) по адресу: 119435, г. Москва, ул. Большая Пироговская, д.2, строение 1

С диссертацией можно ознакомиться в Фундаментальной учебной библиотеке ФГАОУ ВО Первый МГМУ им. И.М. Сеченова Минздрава России (Сеченовский Университет) по адресу: 119034, г. Москва, Zubovskiy bulvar, d.37/1 и на сайте организации: <https://www.sechenov.ru>

Автореферат разослан « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2026 г.

Ученый секретарь диссертационного совета  
доктор медицинских наук, профессор



**Крупинов Герман Евгеньевич**

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы исследования

В России, согласно данным Минздрава РФ и иных исследований, распространённость гонартроза составляет до 13 % взрослого населения. Также, гонартроз является одной из ведущих причин потери трудоспособности [Ассоциация травматологов-ортопедов России 2021]. Патогенез гонартроза сложен и его лечение носит комплексный характер. Основным патогенетическим проявлением гонартроза является поражение суставного хряща. Консервативное лечение рекомендовано на ранних этапах развития гонартроза, а хирургическое – на более поздних, однако консервативное лечение может и должно применяться на поздних этапах в комплексе с хирургическим [Лычагин А.В. 2017; Ассоциация травматологов-ортопедов России 2021].

При наличии патологий внутрисуставных структур с целью избежать или отсрочить эндопротезирование на ранних стадиях гонартроза может быть показана артроскопия коленного сустава [Strobel, M. J. 2013; Thorlund, J. V. et al. 2014; Brelín, A. M. et al. 2019].

В процессе артроскопии часто требуется выполнить обработку хряща в очаге хондропатии для чего обычно применяют механические и холодноплазменные инструменты, однако во время их использования сложно контролировать степень и область воздействия на хрящ, что обуславливает существенные риски повреждения тканей, смежных с обрабатываемой областью. Лазерные методы позволяют дозировать воздействие на ткани и благодаря этому менее травматичны для хряща, окружающего обрабатываемую область, что даёт возможность производить более точные и менее объёмные воздействия [Иванников С.В. и соавт. 2011]. Кроме того, имеются данные о том, что лазерная обработка способна стимулировать регенерацию суставного хряща по механизмам механобиологии [Баум О.И. 2016; Соболев Э.Н. и соавт. 2017; Alexandrovskaya Y. M. et al. 2018] и фотобиомодуляции [Amaroli A. et al. 2016; Deshpande B. R. et al. 2016; Pasternak-Mnich K. et al. 2019].

Включение лазерной обработки очагов хондропатии в комплекс лечения пациентов с гонартрозом потенциально способно улучшить функциональные результаты артроскопических операций на коленном суставе. Однако до сих пор нет чёткого стандарта для артроскопической обработки очагов хондропатии с помощью лазерного излучения. Данные публикаций разрозненны, различные исследовательские группы использовали разные параметры лазерного воздействия. Необходимость стандартизации как лазерной обработки, так и её описания также указывают авторы, пытавшиеся ранее эти публикации систематизировать [Иванников С.В. и соавт. 2011; Fekrazad R. et al. 2016; Escudero J. S. V. et al. 2019]. Это существенно сужает возможности применения лазерных артроскопических методик в лечении пациентов с гонартрозом, которые до сих пор не нашли широкого распространения. Необходима разработка комплексной методики для эффективной артроскопической лазерной обработки очагов хондропатии. В методике должны быть учтены все параметры лазерного воздействия. Для этого воздействия должны быть изучены все аспекты его влияния на хрящ, чтобы гарантировать безопасность методики. Это обуславливает актуальность данной работы.

### **Степень разработанности темы исследования**

Слово «LASER» – аббревиатура, расшифровывающаяся как «Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation» – «Усиление света путем стимулированного выброса излучения». Лазерное излучение имеет три важных свойства. Первое – когерентность (разность фаз колебаний волн света в лазерном излучении всегда постоянна). Второе – монохроматичность (длины всех волн излучения в лазере одинаковы). Третье – узконаправленность (лазерное излучение плохо рассеивается и движется практически всегда по прямой). Благодаря этим свойствам лазерная обработка очагов хондропатии позволяет точно дозировать воздействие на обрабатываемую ткань и смежные с ней области. Это даёт лазерной обработке преимущество по сравнению с холодноплазменной абляцией, при которой степень термического воздействия менее контролируема.

Результаты клинического применения лазерной обработки очагов хондропатии сильно разнятся. Часть авторов пишет о безопасности применения лазерного излучения. Другая группа указывает на тяжёлые осложнения, связанные с применением лазера. Эта ситуация вызвана тем, что эффект воздействия лазерного излучения на ткань зависит от различных параметров (мощность и длина волны самого излучения, длительность воздействия, среда воздействия). Однако, в публикациях различных авторов параметры лазерного воздействия сильно отличаются, и часто приводятся не полностью, что существенно затрудняет разработку стандартов применения лазерной обработки очагов хондропатии.

Таким образом, существует необходимость в создании методики лазерной обработки очагов хондропатии, с чётко описанными, изученными и безопасными параметрами воздействия.

### **Цель и задачи исследования**

#### **Цель исследования:**

Создание методики двухволновой лазерной артроскопической обработки очагов хондропатии при гонартрозе.

#### **Задачи исследования:**

1. Определить в эксперименте параметры лазерного излучения для обработки очагов хондропатии, не вызывающие необратимого термического повреждения тканей в зоне обработки и смежных с ней областях.
2. Определить в эксперименте коэффициенты преломления и поглощения лазерного излучения в суставном хряще для прогнозирования эффективности лазерной обработки.
3. Разработать хирургическую технику артроскопической двухволновой лазерной обработки очагов хондропатии коленного сустава.
4. Внедрить в клиническую практику и оценить результаты применения двухволновой лазерной обработки очагов хондропатии в комплексе лечения пациентов в гонартрозом.

## **Научная новизна**

1. Впервые изучено в эксперименте термическое воздействие на суставной хрящ сочетанного двухволнового лазерного излучения  $\lambda=0,97$  мкм +  $\lambda=1,56$  мкм; доказана безопасность его термического воздействия и определена (методом подвижных интегрирующих сфер) степень проникновения в ткани в зависимости от длины волны.

2. Впервые разработана методика артроскопической обработки суставного хряща коленного сустава в очаге хондропатии с использованием сочетанного лазерного воздействия  $\lambda=0,97$  мкм +  $\lambda=1,56$  мкм, проведено ее клиническое внедрение и доказана эффективность.

## **Теоретическая и практическая значимость работы**

1. Обоснование эффективности применения сочетанного двухволнового лазерного излучения  $\lambda=0,97$  мкм +  $\lambda=1,56$  мкм для артроскопической обработки очагов хондропатии позволяет использовать такое воздействие при лечении пациентов с гонартрозом.

2. Применение разработанной методики артроскопического вмешательства, включающего лазерную обработку очагов хондропатии, позволило уменьшить глубину дефектов хряща.

## **Положения, выносимые на защиту**

1. Обработка очагов хондропатии сочетанным двухволновым излучением  $\lambda=0,97$  мкм +  $\lambda=1,56$  мкм с параметрами, обоснованными в ходе проведенных экспериментов, не вызывает необратимого термического повреждения тканей в зоне обработки и смежных с ней областях.

2. Обработка очагов хондропатии сочетанным двухволновым излучением  $\lambda=0,97$  мкм +  $\lambda=1,56$  мкм с параметрами, обоснованными в ходе проведенных экспериментов, способна приводить к уменьшению глубины дефекта хряща.

## **Методология и методы исследования**

Методология диссертационной работы соответствует цели и задачам исследования, его проведение одобрено этическим комитетом ФГАОУ ВО Первый МГМУ имени И.М. Сеченова Минздрава России (Сеченовский

Университет) (протокол №16-19 от 04.12.2019г.) Исследование выполнено в период с 2019 по 2023 годы. Доклинический этап работы включал проведение шести групп экспериментов и создание (на основании экспериментальных данных) методики артроскопической обработки суставного хряща коленного сустава в очаге хондропатии. В клиническом этапе работы приняло участие 40 пациентов мужского и женского пола в возрасте от 23 до 75 лет с хондропатиями коленного сустава II-IIIст. До операции всем пациентам проводили стандартное обязательное предоперационное обследование (в том числе МРТ коленного сустава), а также выполняли анкетирование по опросным шкалам. Всем пациентам была выполнена артроскопия коленного сустава по стандартной методике. В ходе артроскопии всем пациентам выполняли лазерную обработку очагов хондропатии согласно разработанной методике. В послеоперационном периоде для всех пациентов применяли стандартный алгоритм реабилитации. Повторное обследование у всех пациентов включало анкетирование по опросным шкалам, а также контрольную МРТ коленного сустава.

### **Степень достоверности и апробация результатов**

Материалы работы доложены на:

- 1) VIII Пироговском форуме травматологов-ортопедов;
- 2) IX Национальном конгрессе с международным участием «Медицинская помощь при травмах».

### **Внедрение результатов работы**

Результаты исследования внедрены в практику ГБУЗ ГКБ им. С.П. Боткина ДЗМ, являющейся клинической базой кафедры травматологии, ортопедии и хирургии катастроф Сеченовского Университета. Материалы исследования использованы также в преподавании курсов травматологии и ортопедии студентам, клиническим ординаторами аспирантам, проходящим обучение в ФГАОУ ВО Первый МГМУ имени И.М. Сеченова Минздрава России (Сеченовский Университет).

### **Личный вклад автора**

Автору принадлежит ведущая роль в выборе направления исследования, определении цели и задач, разработке дизайна исследования, осуществлении экспериментальной деятельности, создании методики артроскопической лазерной обработки суставного хряща. Он провёл экспериментальный этап работы и, проанализировав его результаты, разработал алгоритмы обследования и лечения пациентов, лично проводил их отбор, обследование и анкетирование. Лично выполнял операции у всех пациентов, осуществлял контроль в динамике пациентов в группах наблюдения в соответствии с разработанным протоколом, провёл анализ полученных результатов, оценил степень значимости полученных различий с помощью программ статистической обработки, сформулировал выводы и практические рекомендации.

### **Соответствие диссертации паспорту научной специальности**

Диссертационная работа соответствует паспорту специальности 3.1.8. «Травматология и ортопедия», а именно пункту 4 «Экспериментальная и клиническая разработка и совершенствование методов лечения заболеваний и повреждений опорно-двигательной системы, их последствий, а также предупреждение, диагностика и лечение возможных осложнений». Области исследования: разработка методов лечения гонартроза и их внедрение в клиническую практику.

### **Публикации по теме диссертации**

По материалам диссертации опубликовано 4 печатных работы, отражающих основные результаты диссертации, в том числе 3 научных статьи в журналах, включенных в Перечень ВАК при Минобрнауки России; 1 статья в издании, входящем в базу данных RSCI.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертация изложена на 197 страницах стандартного текста, включающего введение, главу обзора литературы, 3 главы собственных исследований, заключение, выводы, практические рекомендации и список использованной

литературы, содержащий 393 источника, из которых 144 отечественных и 249 зарубежных авторов. В работе 59 рисунков и 18 таблиц.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

### Экспериментальный этап

Была проведена серия экспериментов с целью подбора оптимальных (с точки зрения безопасности и эффективности) параметров лазерного воздействия, которое можно рекомендовать для обработки очагов хондропатии в коленном суставе.

### Первая группа экспериментов

**Цель:** макроскопическая оценка результата воздействия на суставной хрящ лазерного излучения различных мощностей.

**Материалы:** в качестве объектов воздействия были использованы экспланты суставных хрящей свиньи (20 штук).

**Ход эксперимента:** на эксплантах суставных хрящей свиньи с помощью скальпеля проделывали сквозные надрезы. Края образовавшихся дефектов обрабатывали с помощью лазерного излучения. Обработку производили до достижения «сглаживания» краёв дефекта. Для обработки использовали излучение с разными длинами волн и мощностями.

По завершении лазерной обработки эксплантов хрящей, с целью определения зоны термического воздействия, экспланты окрашивали раствором нитро-синего тетразолий хлорида (NBT).

**Результат:** при обработке хряща двухволновым излучением с длинами волн  $\lambda=0,97$  мкм и  $\lambda=1,56$  мкм, наивысшая скорость «сглаживания» краёв дефекта соответствовала режиму  $0,97\text{мкм}/30\text{Вт}+1,56\text{мкм}/15\text{Вт}$ , а зона термического воздействия, визуализировавшаяся при окраске препаратов раствором NBT, была такой же, как и у излучений с меньшей мощностью.

Однако зона термического воздействия всё же оставалась сравнительно обширной, а влияние длительности воздействия лазерного излучения на степень нагрева хряща оставалась неизученной.

В связи с этим был предпринят ряд дальнейших экспериментов над аналогичными эксплантами хряща с использованием лазерного излучения с меньшими, но достаточными для «сглаживания» суставной поверхности мощностями, и проведено исследование с использованием импульсно-периодических и непрерывных режимов излучения.

### **Вторая группа экспериментов**

**Цель:** макроскопическая оценка результата воздействия на суставной хрящ лазерного излучения с различной периодизацией воздействия.

**Материалы:** в качестве объектов воздействия были использованы экспланты суставных хрящей свиньи (18 штук).

**Ход эксперимента:** на эксплантах суставных хрящей свиньи с помощью скальпеля проделывали сквозные надрезы. Края образовавшихся дефектов обрабатывали с помощью лазерного излучения. Также подвергали точечному воздействию лазерного излучения с различными параметрами. Каждый отдельный эксплант подвергали воздействию только с одним отдельным набором параметров. По завершению воздействия, экспланты окрашивали раствором нитро-синего тетразолий хлорида (NBT).

**Результат:** импульсно-периодическое 100мс/50мс двухволновое  $\lambda=0,97$  мкм/3Вт +  $\lambda=1,56$  мкм/5Вт излучение оказывает на ткани, смежные с обрабатываемой областью наименьшее макроскопически видимое термическое воздействие среди излучений, мощность которых достаточна для «сглаживания» разволокнутого хряща.

Однако отсутствие видимой без дополнительного увеличения карбонизации не означает её полного отсутствия, а визуализированная за счёт окраски NBT зона термического воздействия, хотя и сравнительно не велика, но всё же заметно больше обрабатывавшегося дефекта. В связи с этим был предпринят ряд дальнейших экспериментов с целью определения термической безопасности данных параметров воздействия.

### Третья группа экспериментов

**Цель:** гистологическое исследование эксплантов хряща после лазерной обработки очага хондропатии.

**Материалы:** в качестве объектов воздействия были использованы экспланты суставных хрящей мыщелков бедренной кости человека (18 штук) с очагами хондропатии, взятые во время операции по тотальному эндопротезированию коленного сустава.

**Ход эксперимента:** Экспланты суставных хрящей мыщелков бедренной кости человека с очагами хондропатии подвергали воздействию импульсно-периодического двухволнового (1,56 мкм / 5 Вт и 0,97 мкм / 3 Вт) лазерного излучения с длительностью импульсов 100мс и паузой 50мс. Расстояние от торца световода до поверхности хряща составляло 2 мм. Длительность воздействия составляла 2 с. Далее из эксплантов по общепринятой методике были изготовлены микропрепараты, которые были окрашены гематоксилином и эозином. Окрашенные микропрепараты просматривали на цифровом сканирующем микроскопе 3D histech panoramic 250 flash (ZEISS Connecting Solutions)

**Результат:** Оптимальной комбинацией при воздействии в среде физиологического раствора лазерным излучением на хрящевую ткань, обеспечивающей восстановление формы суставного хряща без термической деструкции хондроцитов, является сочетанное воздействие излучений  $\lambda = 0,97$  мкм при мощности 3 Вт и  $\lambda = 1,56$  мкм, при мощности 5 Вт с расстояния 1-2 мм в течение 2 с.

Однако отсутствие термической деструкции хондроцитов непосредственно во время воздействия ещё не означает, что они совсем не пострадали. Известно, что, нагрев хондроцита выше 70 °С приводит к необратимым изменениям, приводящим в дальнейшем к разрушению хондроцитов. В связи с этим был проведён ряд экспериментов с целью более точного определения степени нагрева суставного хряща в областях, смежных с подвергающимися лазерному воздействию.

### Четвёртая группа экспериментов

**Цель:** изучение изменений температуры на поверхности хряща при лазерном воздействии.

**Материалы:** в качестве объектов воздействия были использованы экспланты суставных хрящей коленного сустава быка (16 штук). Бык был забит за несколько часов до взятия эксплантов.

**Ход эксперимента:** Экспланты суставных хрящей быка были закреплены в контейнере с 0,9% изотоническим раствором NaCl на глубине 300 мкм (Рисунок 3.6). На поверхности эксплантов устанавливали сапфировую пластинку толщиной 300 мкм. Таким образом, эксплант хряща был погружен в раствор NaCl, как это происходит во время артроскопических операций. Что касается сапфировой пластинки, то она тоже была погружена в жидкость на свою толщину так, что ее верхняя поверхность оставалась на одном уровне с поверхностью жидкости, не погружаясь в неё. Эта пластинка свободно пропускала лазерное излучение, выходящее из волокна, которое поглощалось в экспланте нижележащей хрящевой ткани. При этом тепловое инфракрасное излучение нагревало сапфировую пластинку, что позволяло тепловизору снимать распределение тепловых полей с ее поверхности. Если бы такой пластинки не было, то тепловизор показал бы температуру на поверхности водного раствора над эксплантом хряща и такая картинка могла сильно отличаться от реального распределения температуры на поверхности хряща. Поскольку сапфир, как хорошо известно, обладает высокой теплопроводностью и малой теплоемкостью, то использование в такой конфигурации тонкой пластинки позволяет получать очень близкую к реальности картину распределения теплового поля на поверхности хряща. Над эксплантами хрящей в растворе NaCl, покрытых сапфировой пластинкой, перпендикулярно к ним устанавливали волоконный хирургический инструмент (кварц-кварцевый световод) с диаметром светонесущей жилы 600 мкм, подсоединённый к двухволновому лазерному аппарату ЛСП – «ИРЭ-Полус» (НТО «ИРЭ-Полус», Россия).

**Результат:** Максимальное изменение температуры поверхности хряща происходит в пределах 1 мм от оси распространения лазерного луча.

Поверхность хряща на расстоянии 1 мм вокруг оси падения лазерного луча нагревается на  $21,8 \pm 0,4$  °С. Таким образом, при артроскопической лазерной обработке очага хондропатии живого человека, нагрева поверхности хряща свыше 70 °С, а, следовательно, и необратимых изменений в хондроцитах не произойдёт. Однако, с помощью тепловизора можно измерить только температуру на поверхности хряща, а изменения температуры в толще хряща оставались неизученными. В связи с этим была проведена следующая группа экспериментов.

### **Пятая группа экспериментов**

**Цель:** изучение изменений температуры в глубине хряща при лазерном воздействии.

**Материалы:** в качестве объектов воздействия были использованы экспланты суставных хрящей коленного сустава быка (11 штук).

**Ход эксперимента:** экспланты суставных хрящей быка закрепляли в контейнере с 0,9% изотоническим раствором NaCl на глубине 3 см, для создания условий распространения излучения, соответствующих артроскопической операции. Над эксплантами хрящей перпендикулярно к ним устанавливали волоконный хирургический инструмент (кварц-кварцевый световод) с диаметром светонесущей жилы 600 мкм, подсоединённый к двухволновому лазерному аппарату ЛСП – «ИРЭ-Полюс» (НТО «ИРЭ-Полюс», Россия). Расстояние от торца световода до поверхности эксплантов составляло 2 мм. На поверхности эксплантов, противоположной той, с которой был размещён световод (то есть со стороны, обычно примыкающей к субхондральной кости), при помощи иглы создавали тонкий канал, куда была помещена точечная термопара диаметром 76 мкм. Термопару устанавливали в толще хрящевой ткани на глубине в 1 мм под поверхностью эксплантов вначале точно на оси распространения лазерного луча, затем на расстоянии 1 мм и 2 мм от оси распространения лазерного луча. На поверхность суставной ткани производили воздействие двухволновым 1,56 мкм /

5 Вт + 0,97 мкм /3 Вт лазерным излучением в импульсно-периодическом режиме с длительностью импульса 100 мс и паузой 50 мс в течение 2 с. Изменения температуры эксплантов хрящей в зоне расположения термодпары регистрировались в течение 5 с от начала воздействия.

**Результат:** Наиболее значимое ( $\Delta \text{Temp} = 11 \text{ }^\circ\text{C}$ ) изменение температуры хряща (при измерении на глубине 1 мм под поверхностью экспланта) происходит в пределах до 1 мм (если считать расстояние по поверхности экспланта) от оси распространения лазерного излучения, так как на расстоянии 1 мм максимальное изменение температуры уже значительно меньше, а на расстоянии 2 мм отличается от расстояния в 1 мм всего на  $1^\circ\text{C}$ .

Таким образом, при артроскопической лазерной обработке очага хондропатии живого человека, нагрева хряща выше  $70 \text{ }^\circ\text{C}$  не происходит уже в пределах 1 мм под поверхностью даже на оси распространения лазерного излучения, следовательно, температура хряща при лазерной обработке будет значительно ниже  $70^\circ\text{C}$  и необратимых изменений в хондроцитах не произойдёт.

### **Шестая группа экспериментов**

**Цель:** оценка коэффициентов поглощения и рассеивания лазерного излучения в хрящевой ткани

**Материалы:** В качестве объектов воздействия были использованы экспланты суставного хряща свиньи (11 штук).

**Ход эксперимента:** При помощи криомикротомы из эксплантов хрящевой ткани свиньи были изготовлены тонкие срезы толщиной 100 мкм и 200 мкм. Срезы были помещены между 2 предметными стёклами, смоченными изотоническим 0,9 % раствором NaCl. Для измерения оптических свойств образцов был использован «метод подвижных интегрирующих сфер».

**Результат:** При лазерной обработке очага хондропатии сочетанным излучением  $\lambda=0,97 \text{ мкм} + \lambda=1,56 \text{ мкм}$ , излучение  $\lambda=1,56 \text{ мкм}$  преимущественно поглощается поверхностью хряща. Таким образом излучение  $\lambda=1,56 \text{ мкм}$  вносит наибольший вклад в нагрев хряща, «сглаживание» его поверхности, а также индукцию регенерации хряща по механизмам механобиологии.

В свою очередь излучение  $\lambda=0,97$  мкм, преимущественно рассеиваясь в толще суставного хряща, может в большей степени стимулировать регенераторные процессы в хряще и подлежащей субхондральной кости по механизмам механобиологии и фотобиомодуляции.

### **Итоги экспериментального этапа**

Оптимальной комбинацией при воздействии в среде физиологического раствора лазерным излучением на хрящевую ткань, обеспечивающей «сглаживание» суставного хряща без термической деструкции хондроцитов, является сочетанное воздействие излучений  $\lambda= 0,97$  мкм при мощности 3 Вт и  $\lambda=1,56$  мкм, при мощности 5 Вт с расстояния 1-2 мм в течение 2 с.

### **Разработка методики**

Во время второго этапа исследования, на основании данных экспериментального этапа была разработана оригинальная методика артроскопической лазерной обработки очагов хондропатии коленного сустава.

В качестве источника излучения мы использовали двухволновый волоконный лазерный аппарат ЛСП – «ИРЭ-Полюс» (НТО «ИРЭ-Полюс», Россия) с длинами волн излучения  $\lambda=0,97$  мкм (до 30 Вт) и  $\lambda=1,56$  мкм (до 15 Вт) и прямым выводом излучения через кварц-кварцевый световод с диаметром светонесущей жилы 600 мкм. Параметры лазерного излучения были выбраны на основании экспериментального этапа исследования. Мощность излучения  $\lambda=0,97$  мкм устанавливали на 3 Вт. Мощность излучения  $\lambda=1,56$  мкм устанавливали на 5 Вт. Для обоих излучений  $\lambda=0,97$  мкм устанавливали импульсно-периодический режим, где импульс длится 100 мс, а периоды между импульсами составляют 50 мс.

Предоперационную подготовку, анестезиологическое пособие и укладку пациентов осуществляли стандартно для артроскопии коленного сустава. Через стандартные порты осуществляли артроскопический доступ. При наличии показаний выполняли необходимые артроскопические манипуляции, такие как парциальная резекция мениска, иссечение спаек или удаление хондромных тел.

Далее выполняли лазерную обработку очагов хондропатии выполняли следующим образом:

1) Очаг хондропатии визуализировали (Рисунок 1). При наличии особенно крупных дегенеративно изменённых фрагментов разволокнённого хряща они могли быть частично удалены при помощи артроскопических кусачек или артроскопического шейвера.



Рисунок 1 – Артроскопическая картина очага хондропатии медиального мыщелка бедренной кости до лазерной обработки. Степень хондропатии III по ICRS

2) Источник излучения переводили в режим «готов». В данном режиме нажатие на педаль запускает генерацию лазерного излучения с ранее выбранными параметрами. Кроме того, в режиме «готов» источник постоянно генерирует так называемое «пилотное излучение» (оно не оказывает термического воздействия, но видимо глазу, что позволяет нацеливать рабочее излучение, которое глазу не видимо). К очагу хондропатии подвели световод на расстояние приблизительно 1-2 мм.

3) Нажатием на управляющую педаль источник излучения переводили в режим генерации рабочего излучения. Во время обработки световод размещали относительно очага хондропатии так, чтобы расстояние от торца световода до обрабатываемой поверхности составляло 1-2 мм. В процессе обработки постоянно

производили смещение световода концентрическими либо штрихообразными движениями так чтобы максимальная длительность непрерывного воздействия излучения на одну точку не превышала 2 секунд. На протяжении всей обработки расстояние от точки выхода излучения из световода до обрабатываемой поверхности хряща должно было составлять 1-2 мм. Нежелательно допускать соприкосновения световода и хряща, так как это может привести к избыточному термическому воздействию. Слишком большое расстояние в свою очередь делает воздействие менее эффективным. В большинстве случаев использовали световод с боковым ( $90^\circ$ ) выводом излучения (Рисунок 2), однако в ситуациях, когда локализация дефекта не позволяла эффективно применить такой световод, его заменяли на световод с прямым выводом излучения (Рисунок 3). Таким образом производили обработку всей площади очага хондропатии. Визуальным критерием успешного завершения обработки являлось «сглаживание» разволокнувшейся поверхности хряща (Рисунок 4). Среднее время обработки очага хондропатии составляло 10-30 секунд в зависимости от площади и формы очага.

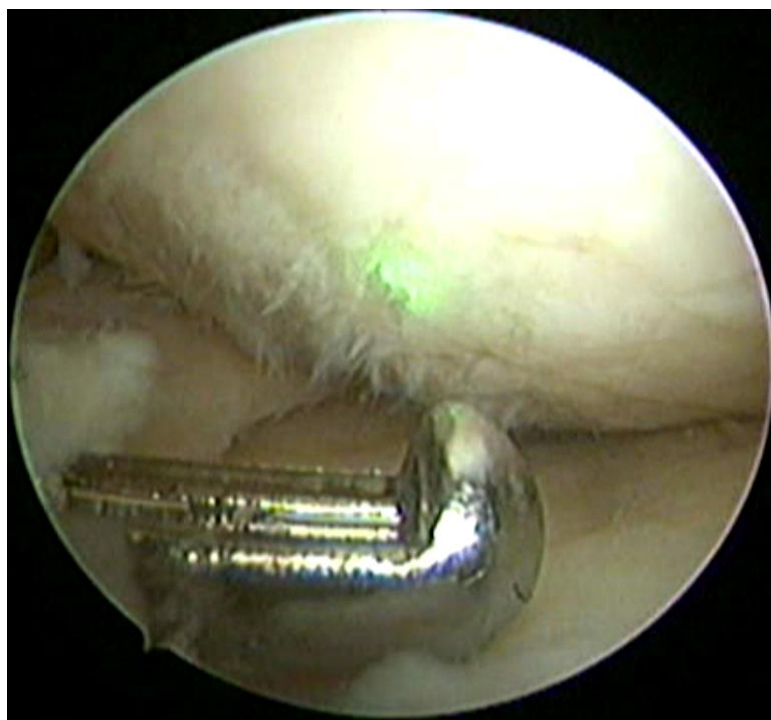
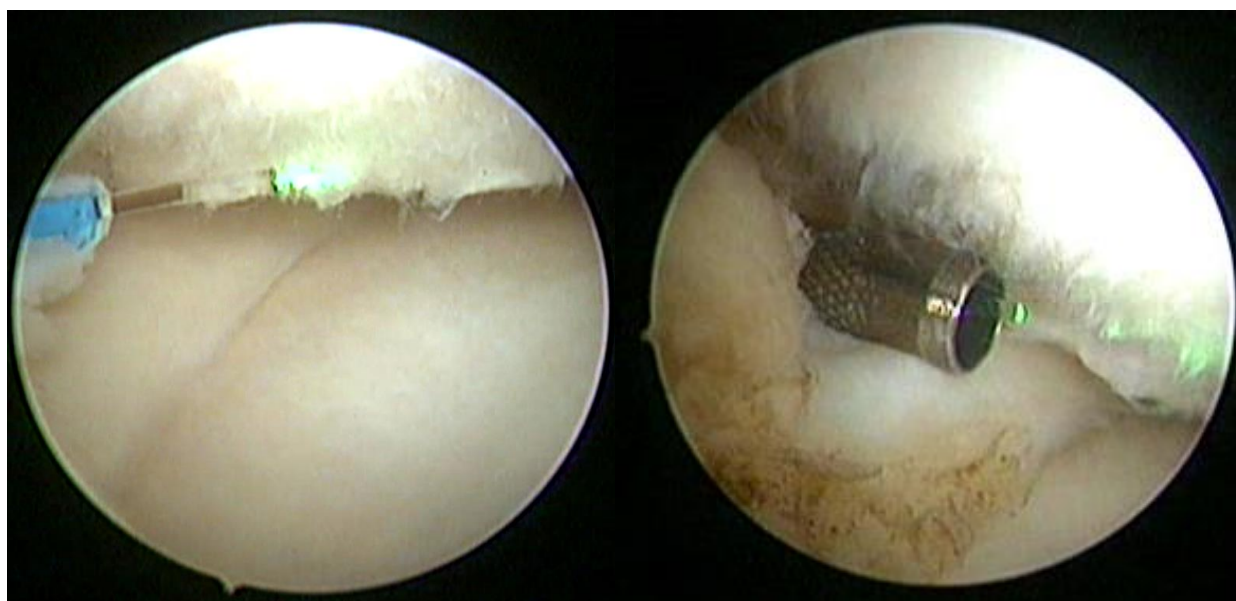


Рисунок 2 – Артроскопическая лазерная обработка очага хондропатии медиального мыщелка бедренной кости. Используется световод с боковым выводом излучения лазерное излучение с длиной волны 0,97 мкм и 1,56 мкм



а

b

Рисунок 3 – Артроскопическая лазерная обработка очага хондропатии медиального мыщелка бедренной кости. Используется световод с прямым выводом излучения, лазерное излучение с длиной волны 0,97 мкм и 1,56 мкм

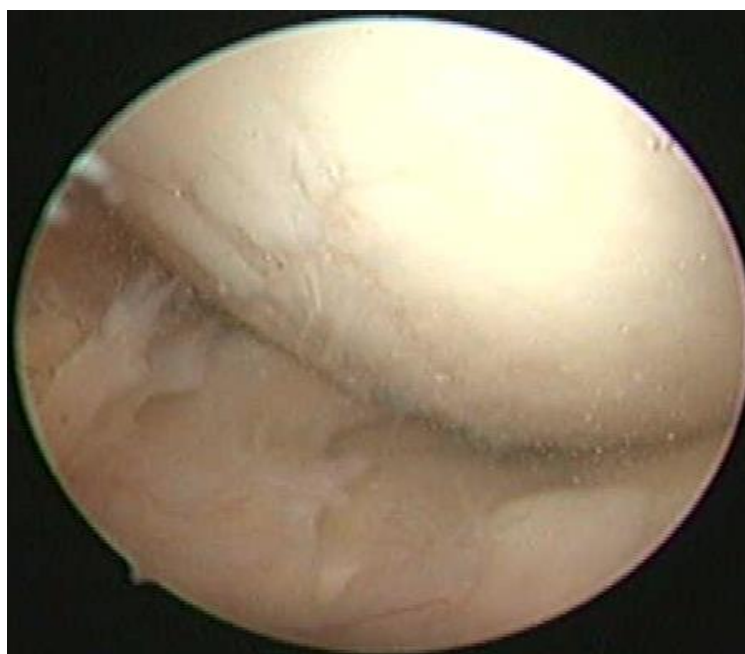


Рисунок 4 – Артроскопическая картина очага хондропатии медиального мыщелка бедренной кости у пациента К. после завершения лазерной обработки

4) После завершения обработки, артроскопическую операцию заканчивали. На порты накладывали швы и асептические повязки.

В послеоперационном периоде применяли стандартный алгоритм реабилитации пациентов. Применение лазерной обработки очагов хондропатии

увеличивало продолжительность операции в среднем на 6 минут, что является статистически значимым, но не имеет существенного клинического значения.

### **Клинический этап**

За период с 2020-2023гг. на базе ГКБ им. С.П.Боткина проведено лечение 40 пациентов с хондропатиями коленного сустава II-IIIст. по ISRS. В исследование вошли пациенты с установленным диагнозом: хондропатия мыщелка бедренной кости II, IIIст., и (или) большеберцовой кости II, IIIст., и (или) надколенника, II, IIIст., из них 30 (37,5%) мужчин и 50 (62,5%) женщин, средний возраст  $47,4 \pm 1,7$  лет.

33 пациента (82,5%) были трудоспособного возраста. У 12 (30%) пациентов появление болевого синдрома было чётко связано с травмой, остальные пациенты травму отрицали. У всех пациентов давность травмы составляла более 6 месяцев. У всех пациентов давность возникновения болевого синдрома составляла более 6 месяцев, так как это являлось критерием включения. Все пациенты не являлись профессиональными спортсменами, работали на офисной работе.

Пациентов наблюдали в течение 6 месяцев с момента операции. Всего было определено 2 амбулаторных контроля: спустя 3 месяца с момента операции и спустя 6 месяцев с момента операции. Амбулаторный контроль спустя 3 месяца с момента операции включал в себя клинический осмотр и анкетирование (ВАШ, KOOS, LFI, WOMAC). Амбулаторный контроль спустя 6 месяцев с момента операции включал в себя клинический осмотр, анкетирование (ВАШ, KOOS, LFI, WOMAC), а также контрольную МРТ коленного сустава.

При первичном обследовании проводился сбор анамнеза и клинический осмотр пациентов, включающий оценку болевого синдрома, симптомов повреждения менисков и суставного хряща, ограничений подвижности сустава, нарушений походки. С целью стандартизации обследования производилось анкетирование пациентов по 4 опросным шкалам, включающим вышеописанные критерии: Визуальная аналоговая шкала (ВАШ), Lequesne algofunctional index (LFI), Western Ontario and McMaster Universities Osteoarthritis Index (WOMAC) и

Knee injury and Osteoarthritis Outcome Score (KOOS). Для шкалы KOOS была взята только часть, связанная со спортом и активным времяпрепровождением, так как в шкалах WOMAC и LFI не уделяется достаточного внимания спортивным нагрузкам, мы использовали часть опросной шкалы KOOS, связанную со спортом и активным времяпрепровождением.

Всем пациентам была выполнена артроскопия коленного сустава по стандартной методике, под общей анестезией через стандартные порты. По ходу артроскопии по показаниям выполняли парциальную резекцию мениска, иссечение тела Гоффа, спаек коленного сустава.

Также всем пациентам выполняли лазерную обработку очагов хондропатии по вышеприведённой методике.

В послеоперационном периоде для всех пациентов применяли стандартный алгоритм реабилитации.

У всех пациентов выявлена статистически значимая положительная динамика по показателям всех шкал. Так за 6 месяцев среди всех пациентов средние показатели по исследованным шкалам улучшились в 1,8-2,1 раза ( $p < 0,05$ ).

Кроме того, на контрольных МРТ у 21 (52,5%) пациента отметили уменьшение глубины дефектов суставного хряща в среднем на  $0,5 \pm 0,3$  мм (Рисунок 5).

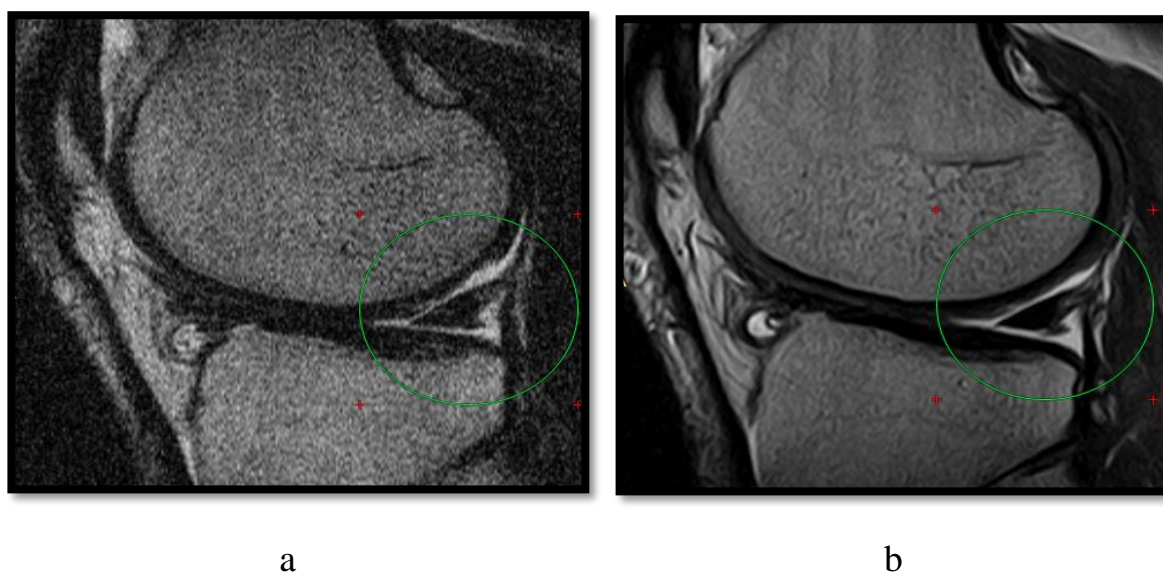


Рисунок 5 – Данные МРТ у пациента Б: а- до операции; б- спустя 6 месяцев после лазерной обработки очага хондропатии

При анализе измерений было выявлено, что наибольшее изменение толщины тканей наблюдается в области наибольшей глубины дефекта. Однако толщина тканей в таких зонах не превышала оной в областях, с изначально меньшей глубиной дефекта. В свою очередь, периферические области очагов хондропатии, где изменения толщины были совсем незначительны, сливались с интактным хрящом, визуальное уменьшая ширину дефекта. Таким образом разница между наибольшей и наименьшей толщиной тканей в очаге хондропатии при повторном исследовании значительно уменьшалась. Очаг приобретал более «сглаженный» вид, хотя полного восстановления толщины до уровня интактного хряща не происходило.

Также следует отметить, что лазерная обработка очагов хондропатии позволила добиться уменьшения глубины дефекта хряща без повреждения субхондральной кости, как это происходит при остеоперфоративных методиках.

Спустя 6 месяцев исследования средние показатели опросных шкал (ВАШ, LFI, KOOS, WOMAC) улучшились в 1,8-2,1 раза ( $p < 0,05$ ), а на контрольных МРТ у 52,5% пациентов отметили уменьшение глубины дефекта хряща среднем на  $0,5 \pm 0,3$  мм.

## ВЫВОДЫ

1. Сочетанное двухволновое лазерное излучение  $\lambda=0,97$  мкм при мощности 3 Вт и  $\lambda=1,56$  мкм при мощности 5 Вт в импульсно-периодическом режиме (длина импульса 100 мс, длина периода 50 мс) при обработке очагов хондропатии не вызывает повышения температуры тканей выше  $70^{\circ}\text{C}$ , а, следовательно, не приводит к необратимым термическим изменениям тканей в зоне обработки и смежных с ней областях.

2. Лазерное излучение  $\lambda=1,56$  мкм преимущественно поглощается поверхностью хряща, способствуя «сглаживанию» его поверхности, а излучение  $\lambda=0,97$  мкм, преимущественно рассеивается в толще суставного хряща, достигая субхондральной кости.

3. Клиническое применение разработанной методики лазерной обработки очагов хондропатии коленного сустава не вызвало осложнений и не увеличило продолжительность операций на клинически значимую величину.

4. Применение разработанной методики позволило без повреждения субхондральной кости к 6 месяцам наблюдения добиться по данным МРТ уменьшения глубины дефекта суставного хряща в среднем на  $0,5 \pm 0,3$  мм у 52,5 % пациентов, а также улучшить средние значения показателей опросных шкал ВАШ (до «слабой»), WOMAC (до «хорошо») и LFI (до «лёгкой»).

### **ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ**

1. В ходе артроскопии коленного сустава при выявлении очагов хондропатии целесообразно выполнять их лазерную обработку с сочетанным двухволновым излучением  $\lambda=1,56$  (5 Вт) +  $\lambda=0,97$  (3 Вт), по разработанной методике, что позволит как добиться сглаживания хрящевой поверхности, так и стимулировать регенераторные процессы.

2. В зависимости от локализации зон хондропатии возможно применение световода как с боковым ( $90^\circ$ ), так и с прямым ( $0^\circ$ ) выводом излучения.

3. Во время лазерной обработки оптимальное расстояние от торца световода до поверхности хряща составляет 1-2 мм. Соприкосновение световода и хряща может привести к нежелательному избыточному термическому воздействию.

4. Для равномерной обработки всей поверхности очага хондропатии следует смещать световод под контролем «пилотного» излучения концентрическими либо штрихообразными движениями

5. Длительность непрерывного облучения одной точки на поверхности хряща не должно превышать 2 секунд. Среднее время обработки очага хондропатии составляет от 10-30 секунд в зависимости от площади и формы очага.

**СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

1. Лазерная обработка хондромалеции суставного хряща / А. В. Лычагин, С. В. Иванников, В. И. Юсупов, Л. А. Семенова, Е. Д. Старцева, **В. В. Сурин**, И.О. Тинькова, А.И. Наиманн, Т.А. Жарова, П.А. Пржевальский, Я Ян // **Лазерная медицина.** – 2022. – Т. 25. – №. 4. – С. 9–15. [RSCI]
2. Термические эффекты при лазерной обработке суставного хряща / С. В. Иванников, А. В. Лычагин, Д. С. Бобров, В. И. Юсупов, Е. Д. Старцева, **В.В. Сурин**, А.И. Найман, Т.А. Жарова, Р.Х. Явлиева // **Кафедра травматологии и ортопедии.** – 2022. – № 2 (48). – С. 43–52.
3. Анализ регенерации гиалинового хряща коленного сустава после лазерной обработки участков хондропатии различной степени / А. В. Лычагин, С. В. Иванников, **В. В. Сурин**, П.И. Петров, Т.А. Жарова, А.И. Найман, Ян Яньбинь, Д.С. Бобров, А.В. Гаркави, И.А. Вязанктн, Ю.Р. Гончарук, М.М. Липина, Е.Б. Калинин, А.Ю. Заров // **Кафедра травматологии и ортопедии.** – 2023. – № 1 (51). – С. 36–46.
4. Поглощение и рассеяние лазерного излучения в суставном хряще при обработке очага хондропатии / А. В. Лычагин, В. И. Юсупов, **В. В. Сурин**, С.В. Иванников, П.И. Петров, О.И. Байцева, Т.К. Маликова, Н.В. Коваленко Е.Д. Шевелкина, А.Ю. Заров // **Кафедра травматологии и ортопедии.** – 2023. – № 1 (51). – С. 47–55