

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ ПЕРВЫЙ МОСКОВСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ МЕДИЦИНСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ  
И.М. СЕЧЕНОВА МИНИСТЕРСТВА ЗДРАВООХРАНЕНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ (СЕЧЕНОВСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

*На правах рукописи*



Азаркин Кирилл Михайлович

**Оптические методы в диагностике патологии крестообразных связок  
коленного сустава**

3.1.8. Травматология и ортопедия

Диссертация

на соискание ученой степени

кандидата медицинских наук

**Научный руководитель:**

доктор медицинских наук, доцент

Калинский Евгений Борисович

Москва – 2026

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	4
ГЛАВА 1. ДИАГНОСТИКА ПОВРЕЖДЕНИЙ КРЕСТООБРАЗНЫХ СВЯЗОК КОЛЕННОГО СУСТАВА И ЕЁ ВЛИЯНИЕ НА РЕЗУЛЬТАТЫ ЛЕЧЕНИЯ ПАЦИЕНТОВ.....	12
1.1. Распространённость повреждений крестообразных связок.....	12
1.2. Анатомо-физиологические особенности .....	13
1.3. Механизмы повреждений .....	15
1.4. Диагностика.....	16
1.5. Лечение .....	23
1.6. Спектроскопия.....	28
ГЛАВА 2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ .....	36
2.1. Дизайн исследования .....	36
2.2. Взятие эксплантов и их характеристика .....	39
2.3. Спектроскопические исследования.....	42
2.4. Клиническое применение разработанной методики .....	48
2.5. Методы статистической обработки.....	50
ГЛАВА 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ЭТАПА ИССЛЕДОВАНИЯ.....	52
3.1. Выбор метода спектроскопии для диагностики состояния крестообразных связок .....	52
3.2. Рабочая классификация и лечебно-диагностический алгоритм .....	64
ГЛАВА 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЛЕЧЕНИЯ ПАЦИЕНТОВ.....	68
4.1. Методика интраоперационной диагностики.....	68
4.2. Характеристика пациентов .....	71
4.3. Результаты проведенного обследования.....	72
4.4. Клинические примеры .....	77
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	85
ВЫВОДЫ .....	94

ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ.....	95
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ .....	96
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	97
ПРИЛОЖЕНИЕ А .....	114
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	118
ПРИЛОЖЕНИЕ В .....	126

## ВВЕДЕНИЕ

### Актуальность темы исследования

Травмы крестообразных связок коленного сустава являются одними из самых распространенных спортивных травм в мире. Только в Соединенных Штатах Америки (США) 250 000 человек ежегодно страдают от разрыва передней крестообразной связки (ПКС), и половина таких повреждений требует реконструктивных операций [58]. Однако в настоящее время только в Норвегии, Дании и Швеции есть национальные веб-регистры, которые точно фиксируют количество проведенных операций по пластике ПКС. На основании обзоров этих реестров с момента их первых записей частота травм ПКС в этих странах составила от 32 до 38 случаев на 100 000 человек [113].

Разрывы задней крестообразной связки (ЗКС), хотя и встречаются не так часто, однако структурное повреждение этой связки происходит у 38% пациентов с травмами колена [68], а долгосрочные последствия таких повреждений весьма разрушительны для коленного сустава. Более 60% травм ЗКС связаны с дополнительными капсуло-связочными повреждениями [96], частоту таких комбинированных травм оценивают в 15-42%. Мужчины чаще подвержены травмам ЗКС, чем женщины, а средний возраст пациентов на момент травмы составляет 28-34 года [60, 61].

Крестообразные связки имеют минимальную способность к заживлению из-за особенностей кровоснабжения, а их микроструктурные нарушения, такие как клеточные изменения и дезорганизация внеклеточного матрикса, изменяют механические свойства связки [94]. Недостаточность крестообразных связок приводит к формированию нестабильности в коленном суставе и развитию гонартроза. У пациентов появляются хронические боли, нарушения походки, мышечная гипотрофия и в итоге – выраженная дисфункция, препятствующая физической активности и снижающая качество жизни [14].

## Степень разработанности темы исследования

Последствия повреждений крестообразных связок можно предотвратить, своевременно выполнив хирургическое вмешательство, заключающееся или в их протезировании (пластике), или в реинсерции. Однако, результаты операции существенно зависят от сроков ее осуществления. В застарелых случаях наступившие изменения в суставе уже плохо поддаются коррекции. В связи с этим очень важен вопрос своевременной диагностики повреждений крестообразных связок, особенно у лиц с высокой физической активностью.

При полных разрывах крестообразных связок клинические симптомы достаточно очевидны и с высокой частотой подтверждаются методами неинвазивных инструментальных обследований (рентгенография, магнитно-резонансная томография, ультразвуковая диагностика), а также в ходе диагностического этапа артроскопического вмешательства. Однако диагностика частичных подсиновиальных разрывов, сопровождающихся микроструктурными изменениями, не столь проста. Клинические и рентгенологические признаки нестабильности коленного сустава могут отсутствовать, а УЗИ и даже МРТ обладают ограниченной чувствительностью к таким повреждениям. Наибольшей точности диагностики из известных традиционных методик позволяет достичь артроскопическая ревизия, когда и визуально, и с помощью артроскопического крючка можно оценить состояние крестообразных связок. Но при подсиновиальных частичных разрывах и артроскопия порой не дает однозначного ответа в отношении не только локализации и объема, но и даже самого наличия таких повреждений.

Сложности диагностики могут обусловить несвоевременное выявление или ошибочную оценку характера и степени повреждений крестообразных связок коленного сустава, неадекватную тактику и ухудшение результатов проводимого лечения.

Задачу определения состояния тканей без взятия биопсии могут помочь решить методики оптической спектроскопии, получившие уже широкое

применение в различных областях медицины – общей хирургии, эндокринологии, урологии, кардиохирургии, онкодерматологии, нейрохирургии [4]. В травматологии и ортопедии их применяют не столь широко, однако есть сообщения о применении оптической спектроскопии для оценки состояния суставного хряща [4, 18, 65, 78, 80, 86], а также для уточнения границ ампутации нижней конечности при различных патологиях [53]. Сообщения о применении оптической спектроскопии для верификации повреждений крестообразных связок коленного сустава в доступной литературе отсутствуют, однако, судя по опыту диагностики патологии тканей других локализаций, оптическая спектроскопия в этом отношении может быть эффективной.

Наиболее подходящими методиками для оценки состояния тканей, из которых состоят связки, являются, по данным литературы, спектроскопия диффузного отражения (СДО), Рамановская спектроскопия (РС) и флуоресцентная спектроскопия (ФС) [32, 85]. Клиническое применение оптических методик до сих пор разработано недостаточно, в связи с чем изучение диагностических возможностей спектроскопии в отношении состояния крестообразных связок коленного сустава представляется весьма актуальным, так как могло бы повысить точность диагностики и скорректировать хирургическую тактику.

## **Цель и задачи исследования**

### **Цель исследования:**

Повышение точности диагностики состояния крестообразных связок коленного сустава с помощью методов оптической спектроскопии.

### **Задачи исследования:**

1. Исследовать возможность использования методов оптической спектроскопии для оценки состояния крестообразных связок коленного сустава.

2. Разработать методику диагностики повреждений крестообразных связок коленного сустава с применением оптической спектроскопии и определить корреляцию этих данных с другими диагностическими методиками.

3. Создать с учетом результатов оптической спектроскопии рабочую классификацию повреждений крестообразных связок коленного сустава и разработать на ее основе алгоритм выбора оптимальной лечебной тактики.

4. Определить эффективность предложенной методики уточненной диагностики состояния крестообразных связок коленного сустава, использующей оптические методы.

### **Научная новизна**

Впервые доказана эффективность метода оптической спектроскопии для интраоперационного определения состояния крестообразных связок коленного сустава и изучена корреляция полученных результатов с данными диагностики, проведенной по традиционному протоколу.

Впервые создана классификация состояния крестообразных связок коленного сустава, основанная на данных оптической спектроскопии, на основе чего разработан алгоритм персонализированного выбора лечебной тактики.

### **Теоретическая и практическая значимость работы**

Применение методики оптической спектроскопии в отношении определения состояния крестообразных связок коленного сустава позволяет существенно повысить точность интраоперационной диагностики, особенно при отсутствии явных макроскопических признаков их повреждений.

Разработанная классификация состояния крестообразных связок коленного сустава, основанная на данных оптической спектроскопии, имеет большое значение для выбора оптимальной хирургической тактики, что, в свою очередь способствует улучшению результатов лечения пациентов.

## **Методология и методы исследования**

Исследование состояло из двух этапов. На первом этапе был проведен эксперимент. У пациентов, которым выполняли тотальное эндопротезирование коленного сустава, были взяты 30 эксплантов крестообразных связок (ПКС и ЗКС) вместе с костными блоками в местах прикреплений, после чего подвергли эти экспланты дополнительному исследованию с применением методик спектроскопии диффузного отражения Рамановской спектроскопии и флуоресцентной спектроскопии. По результатам эксперимента определили СДО как наиболее информативную методику в отношении определения состояния крестообразных связок, и, основываясь на показателях, полученных при данном исследовании, разработали собственную рабочую классификацию степени повреждения и алгоритм выбора оптимальной лечебной тактики.

На втором этапе (клиническом) применили разработанную классификацию и алгоритм у 15 пациентов, которым выполняли артроскопию коленного сустава, в результате чего была показана эффективность дополнительной диагностики состояния крестообразных связок с применением СДО, и применен разработанный алгоритм выбора тактики с хорошими результатами лечения.

## **Личный вклад автора**

Тема данного исследования была определена автором на основе проведенного им анализа зарубежной и отечественной научной литературы. Автор сформулировал цель и задачи исследования, разработал его дизайн; лично осуществил взятие и исследование эксплантов крестообразных связок в ходе экспериментального этапа, разработал рабочую классификацию повреждений крестообразных связок и лечебный алгоритм, а также провел интраоперационную оценку состояния крестообразных связок в ходе выполнения артроскопических вмешательств. Полученные результаты были подвергнуты статистической обработке, после чего автор сформулировал выводы и практические рекомендации.



## **Положения, выносимые на защиту**

1. Применение метода оптической спектроскопии повышает точность диагностики повреждений крестообразных связок коленного сустава в тех случаях, когда традиционные методики оказываются малоинформативными.

2. Интраоперационное применение методик оптической спектроскопии крестообразных связок коленного сустава целесообразно использовать в сомнительных случаях и ориентироваться на полученные при этом исследовании данные для коррекции избранной хирургической тактики в ходе проведения артроскопии. Эта диагностическая методика безопасна для пациентов, существенно не увеличивает травматичность и продолжительность операции.

## **Соответствие диссертации паспорту научной специальности**

Диссертация соответствует паспорту научной специальности 3.1.8. Травматология и ортопедия, пунктам 1, 3, 4 направлений исследований: пункт 1 – Изучение этиологии, патогенеза и распространенности врожденных и приобретенных заболеваний опорно-двигательной системы (позвоночника, грудной клетки, таза и конечностей); пункт 3 – Разработка, усовершенствование и внедрение в клиническую практику методов диагностики, профилактики и диспансеризации при заболеваниях и повреждениях опорно-двигательной системы, а также их последствиях; пункт 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.

## **Степень достоверности и апробация результатов**

Достоверность полученных результатов определяется достаточным количеством наблюдений, репрезентативной выборкой данных. Все данные,

собранные в процессе исследования, обработаны при помощи современных методов статистического анализа с использованием соответствующих программ.

Основные положения работы доложены на конференциях: VII Сеченовский международный биомедицинский саммит: «Мегатренды в биомедицине» (SIBS-2023). 09.11.2023, Москва; IX национальный конгресс с международным участием: «Медицинская помощь при травмах: новое в организации и технологиях. Осложнения и неблагоприятные последствия травм. Инновационные подходы в организации медицинской помощи и лечении пострадавших». 02.03.2024, Санкт-Петербург; X юбилейный Национальный конгресс с международным участием: «Медицинская помощь при травмах: новое в организации и технологиях». 01.03.2025, Санкт-Петербург.

Апробация работы состоялась на совместном заседании коллектива кафедры травматологии, ортопедии и хирургии катастроф Института клинической медицины имени Н. В. Склифосовского ФГАОУ ВО Первый МГМУ им. И.М. Сеченова Минздрава России (Сеченовский Университет) (протокол № 7/2026 от 16 февраля 2026 года).

### **Внедрение результатов работы**

Результаты диссертационной работы внедрены в клиническую практику Университетской клинической больницы №1 ФГАОУ ВО Первый МГМУ им. И.М. Сеченова Минздрава России (Сеченовский Университет), а также в учебный процесс кафедры травматологии, ортопедии и хирургии катастроф Института клинической медицины им. Н. В. Склифосовского ФГАОУ ВО Первый МГМУ им. И.М. Сеченова Минздрава России (Сеченовский Университет).

### **Публикации по теме диссертации**

По результатам исследования автором опубликовано 9 работ, в том числе 3 научные статьи в журналах, включенных в Перечень рецензируемых научных

изданий ФГАОУ ВО Первый МГМУ им. И.М. Сеченова Минздрава России (Сеченовский Университет) / Перечень ВАК при Минобрнауки России, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук; 4 иные публикации по результатам исследования, 1 патент, 1 публикация в сборнике материалов международной (зарубежной) научной конференции.

### **Структура и объём диссертации**

Диссертация написана на 127 страницах стандартного текста, состоит из введения, обзора литературы, 3 глав собственных исследований, заключения, выводов, практических рекомендаций, списка сокращений и условных обозначений, а также списка литературы, содержащего 127 источников – 31 отечественных и 96 зарубежных авторов, а также 3 Приложений. Работа иллюстрирована 29 рисунками и 9 таблицами.

# ГЛАВА 1. ДИАГНОСТИКА ПОВРЕЖДЕНИЙ КРЕСТООБРАЗНЫХ СВЯЗОК КОЛЕННОГО СУСТАВА И ЕЁ ВЛИЯНИЕ НА РЕЗУЛЬТАТЫ ЛЕЧЕНИЯ ПАЦИЕНТОВ

## 1.1. Распространённость повреждений крестообразных связок

В настоящее время национальные регистры, отражающие число выполненных реконструкций передней крестообразной связки (ПКС), и, соответственно, истинную частоту ее повреждений, существуют только в Норвегии, Дании и Швеции. Анализ данных, представленных в указанных регистрах, выявил следующую частоту травм ПКС на 100 000 населения: 34 в Норвегии, 38 в Дании и 32 в Швеции [113]. В Соединенных Штатах Америки ежегодно выполняется от 100 000 до 200 000 хирургических реконструкций ПКС при травмах коленного сустава [44]. Отмечается, что женщины, активно занимающиеся спортивной деятельностью, демонстрируют повышенную предрасположенность к повреждениям ПКС. Согласно статистическим данным, одна из 60-100 спортсменок имеет в анамнезе повреждение ПКС [1]. Результаты национального исследования, проведенного в Исландии, свидетельствуют о том, что средний возраст пациентов на момент получения травмы ПКС составляет 33,9 года. При этом выявлены статистически значимые различия в возрастном распределении травм между полами: у мужчин наблюдается пик заболеваемости в начале третьего десятилетия жизни, тогда как у женщин отмечаются два пика – в подростковом возрасте и в возрасте около 40 лет. Данные особенности приводят к тому, что средний возраст травмы ПКС у женщин ( $35 \pm 16$  лет) несколько превышает аналогичный показатель у мужчин ( $33 \pm 13$  лет) [84].

Ежегодную частоту повреждений задней крестообразной связки (ЗКС) в общей популяции оценивают примерно в 2 случая на 100 000 человек [60]. Изолированные разрывы ЗКС представляют собой относительно редкую патологию, составляя лишь 3% повреждений коленного сустава, которые в 95% случаев сочетаются с повреждениями других связочных структур [19]. Разрывы

ЗКС демонстрируют гендерную предрасположенность, характеризующуюся превалированием мужского пола, который составляет от 60 до 84% случаев как изолированных, так и комбинированных повреждений ЗКС [106]. Согласно данным, представленным в научной литературе, средний возраст пациентов на момент получения травмы составляет  $27,5 \pm 9,9$  лет [59].

## 1.2. Анатомо-физиологические особенности

Передняя крестообразная связка (ПКС) состоит из плотной соединительной ткани. Ее проксимальное место прикрепления расположено в задней части внутренней поверхности латерального мыщелка бедренной кости. Размер проксимального футпринта может варьироваться от 11 до 24 мм в поперечнике. От своего бедренного прикрепления ПКС проходит кпереди, медиально и дистально к большеберцовой кости. Длина ПКС колеблется от 22 до 41 мм (в среднем 32 мм), а ширина от 7 до 12 мм [36, 108]. Волокна ПКС расходятся веером по мере приближения к месту прикрепления на большеберцовой кости в ямке, расположенной спереди и латеральнее медиального бугорка межмышцелкового возвышения. Эта ямка представляет собой широкую, вдавленную область шириной приблизительно 11 мм (диапазон 8-12 мм) и 17 мм (диапазон 14-21 мм) в переднезаднем направлении [36].

Функционально ПКС делится на два пучка: заднелатеральный (ЗЛП) и переднемедиальный (ПМП). Несмотря на то, что в последнее время некоторые авторы разделяют ПМП ещё на два более мелких пучка – медиальный и латеральный [44], двухпучковая модель общепринята как наиболее приемлемая для понимания функции ПКС. Считают, что основные функции ПКС заключаются в ограничении переднего смещения большеберцовой кости и в ограничении её избыточной внутренней ротации. Для выполнения данных задач нет другой столь же идеально ориентированной пассивной структуры коленного сустава.

При разогнутом коленном суставе пучки ПКС располагаются в сагиттальной плоскости практически параллельно. Во время сгибания происходит небольшая

латеральная ротация связки в целом вокруг ее продольной оси, и ПМП начинает спирально обвиваться вокруг остальной части связки. Это относительное движение одного пучка относительно другого обусловлено ориентацией костных прикреплений ПКС [36, 41]. В положении полного разгибания длины пучков существенно отличаются: ПМП – 34 мм, ЗЛП – 22,5 мм [92]. Эти пучки не являются изометричными при движениях в коленном суставе, а испытывают различные закономерности изменения длины во время пассивного сгибания коленного сустава. ПМП удлиняется и натягивается при сгибании, в то время как ЗЛП укорачивается и ослабляется [119]. ПМП увеличивается на 1,9 мм (5%) при 30° сгибания коленного сустава и на 4 мм (12%) при 90°. Напротив, ЗЛП уменьшается на 3,2 мм (14%) при пассивном сгибании в коленном суставе от 0° до 30° и на 7,1 мм (32%) при сгибании 90° [119]. По сравнению с полным разгибанием задние волокна ослабляются при сгибании, и, таким образом, переднемедиальные волокна остаются единственным ограничением переднего смещения большеберцовой кости.

Задняя крестообразная связка (ЗКС) берет начало на медиальной стенке межмышцелковой вырезки бедренной кости и дистально прикрепляется к углублению между задними отделами медиального и латерального плато большеберцовой кости, известному как фасетка ЗКС [56, 121, 123]. Средняя длина ЗКС варьирует от 32 мм до 38 мм, а средняя площадь поперечного сечения составляет от 11 мм<sup>2</sup> до 13 мм<sup>2</sup> [100].

Основные биомеханические функции ЗКС заключаются в обеспечении ограничения заднего смещения большеберцовой кости при всех углах сгибания и ограничении внутренней и наружной ротации при сгибании свыше 90°. В последних анатомических описаниях ЗКС функционально разделена на переднелатеральный и заднемедиальный пучки [56, 57, 61, 70, 121]. Результаты современных исследований демонстрируют, что данные пучки действуют одновременно на всем диапазоне движений коленного сустава [61, 70]. В связи с взаимозависимым характером изменений длины и ориентации, ни один из пучков ЗКС не может быть однозначно определен как главный на различных углах

сгибания коленного сустава [70, 121]. Оба пучка проявляют более выраженную функциональную активность при сгибании, нежели при разгибании, что подтверждается данными об увеличении их длины в процессе сгибания в коленном суставе [57].

### **1.3. Механизмы повреждений**

Повреждения ПКС, особенно в спорте, чаще всего связаны с непрямым механизмом травмы, во время резкой смены направления движения, внезапной остановки или замедления во время бега, неправильного приземления после прыжка [35, 44]. Повреждение ПКС может возникать и вследствие прямого травматического воздействия на коленный сустав, например, при контактных столкновениях в футболе. Также причиной разрыва ПКС может быть удар, направленный на латеральную поверхность коленного сустава [77].

Повреждение ПКС происходит при переднем смещении большеберцовой кости. Данный специфический характер травмы обусловлен стечением следующих факторов: фиксированное положение стопы, вызванное внешними ограничениями, такими как взаимодействие подошвы обуви с поверхностью, увеличенный угол заднего наклона большеберцовой кости и интенсивное сокращение четырехглавой мышцы бедра во время разгибания в коленном суставе [34]. Кроме того, приложение вальгусной нагрузки к коленному суставу может индуцировать антеролатеральное смещение большеберцовой кости, поскольку латеральный мыщелок бедренной кости демонстрирует тенденцию к заднему смещению на соответствующем участке тибияльного плато [112].

Повреждения ЗКС чаще являются результатом прямого удара в переднюю часть голени при согнутом коленном суставе [106]. Ведущими причинами повреждений ЗКС являются дорожно-транспортные происшествия (при ударе о приборную панель), а также спортивные травмы в американском футболе, лыжном спорте, регби и футболе [121]. Повреждения ЗКС могут также возникать в

результате не прямой травмы, например связанной с неудачным приземлением или с резким изменением направления движения [95].

Механизм повреждения ЗКС обычно связан с внешним воздействием в виде силы, приложенной к передней поверхности проксимальной большеберцовой кости во время сгибания коленного сустава [96]. Кроме того, разрывы ЗКС могут возникать при падении на колено с подошвенным сгибанием стопы [19].

Мукоидная дегенерация. При рассмотрении патологии крестообразных связок коленного сустава доминирующим этиологическим фактором традиционно считают травматические повреждения, в частности разрывы. Однако, согласно современным научным данным, дегенеративные заболевания, такие как остеоартрит, приводят к комплексной деструкции внутрисуставных структур, включая крестообразные связки [98]. Такие изменения называют мукоидной дегенерацией [83]. Мукоидная дегенерация ПКС представляет собой нозологическую единицу, этиопатогенез которой остается предметом дискуссий [82]. Данная патология характеризуется интралигаментарной инфильтрацией мукоидного матрикса, состоящего преимущественно из гликозаминогликанов. Первое описание данного клинического состояния было представлено А.Кумар с соавторами в 1999 году [81]. Мукоидная дегенерация ПКС может вызывать боль и ограничивать объём движений, что приводит к ухудшению качества жизни [120]. На МРТ признаки, указывающие на мукоидную дегенерацию ПКС, выявляют с частотой от 1,3-13,8%. Однако из-за часто бессимптомного течения эта патология может остаться незамеченной [48].

#### **1.4. Диагностика**

Диагностика разрывов крестообразных связок основывается на анамнезе пациента, физикальном осмотре и дополнительных методах визуализации [117].

Основные анамнестические данные, указывающие на возможное повреждение, включают травматическое событие, сообщение о слышимом



«хлопке» или «щелчке», быстро нарастающий гемартроз в течение двух часов после травмы и субъективную нестабильность колена [116].

## **Физикальный осмотр**

### **Повреждения ПКС**

Диагностические тесты выполняют, когда пациент находится в положении лёжа. Ручное усилие применяют для выявления переднего (латерального) подвывиха большеберцовой кости. В случаях недостаточности ПКС и вызванной этим нестабильности колена пациенты часто опасаются полной нагрузки на ногу, что приводит к рефлекторному сокращению мышц бедра. В связи с этим такое обследование может дать ложноотрицательный результат [34]. Определяют 4 степени смещения большеберцовой кости: 0-5 мм: +, 5-10 мм: ++, 10-15 мм: +++, >15 мм: +++++, а также характеристику конечной точки смещения и наличие у пациента предчувствия подвывиха. Кроме того, учитывая индивидуальные отличия пациентов, для точной интерпретации полученных результатов большое значение имеет сравнение с контралатеральной неповрежденной конечностью [110].

Тест Лахмана проводят в положении пациента лежа на спине и коленом, согнутым под углом 15-30°. Дистальную часть бедра фиксируют рукой выше надколенника, затем к большеберцовой кости прикладывают направленную вперед силу при помощи другой руки. Оценивают как величину смещения большеберцовой кости, так и конечную точку [1, 110, 117].

Тест «переднего выдвигающего ящика» выполняют в положении на спине, колено согнуто на 90°. Стопу обследуемого фиксируют на кушетке, а проксимальный отдел голени обхватывают двумя руками и прикладывают силу, направленную кпереди. Как и при выполнении теста Лахмана, оценивают степень переднего смещения голени и конечную точку [1, 34, 110].

Тест pivot-shift также выполняют в положении лежа на спине, голень устанавливают в положении внутренней ротации, а колено сгибают примерно на  $10^\circ$  с вальгусным отклонением. Затем колено постепенно сгибают, в то время как исследователь сохраняет контроль над голенью. Положительный тест обозначается ощутимым «стуком» или сдвигом, обычно происходящим между  $30^\circ$  и  $40^\circ$  сгибания в коленном суставе [1, 110].

Методы инструментального выявления степени нестабильности. Для точной количественной оценки нестабильности коленного сустава были разработаны различные приборы, среди которых наиболее широко используют артрометр КТ-1000/2000 (Medmetric), предложенный еще в начале 1980-х годов. Однако протокол работы КТ-1000/2000 требует применения ручного переднего смещения голени исследователем, что потенциально создает проблемы, связанные с воспроизводимостью и надежностью полученных с помощью этого прибора результатов [1, 104].

### **Повреждения ЗКС**

Диагностика патологии ЗКС в значительной степени зависит от интеграции положительных результатов конкретных клинических тестов, рассматриваемых в сочетании с механизмом травмы и наблюдаемыми клиническими проявлениями [19].

Тест «заднего выдвижного ящика», выполняют при согнутом на  $90^\circ$  колене. Стопу пациента фиксируют на опорной поверхности (кушетке), после чего осуществляют двуручный захват проксимального сегмента голени и прикладывают смещающую силу в заднем направлении. Тест имеет чувствительность около 90% и специфичность – 99%. Примечательно, что при повреждении ЗКС могут определяться ложноположительные результаты теста Лахмана и «переднего выдвижного ящика» [19, 95].

Симптом Клэнси характеризуется аномальным сглаживанием выступов большеберцового плато относительно бедренных мыщелков при пальпации сустава на фоне сгибания голени на  $90^\circ$  и нейтральной ротации [19, 72].

Тест Годфри проводят при согнутом на  $90^\circ$  бедре и голени при поддержке голени исследователем. В случаях разрыва ЗКС изменяются контуры сустава, что можно визуально заметить при боковом осмотре [19, 72, 91].

Тест четырехглавой мышцы выполняют, когда пациент находится в положении лежа на спине, колено согнуто на  $90^\circ$ , а стопа фиксирована исследователем. Положительный результат теста заключается в переднем смещении большеберцовой кости при равномерном сокращении пациентом четырехглавой мышцы бедра [19, 69].

### **Инструментальная диагностика**

К основным методам, применяемым для диагностики патологий крестообразных связок, относятся рентгенография, ультразвуковое исследование (УЗИ), МРТ и артроскопия.

Рентгенологическое исследование в основном используют для исключения переломов, связанных с повреждениями крестообразных связок. На рентгенограммах не визуализируются мягкотканые структуры, и могут быть выявлены лишь косвенные признаки повреждений связок, такие как смещение большеберцовой кости в переднезаднем направлении [67]. Степень заднего смещения большеберцовой кости можно оценить на рентгенограммах, выполненных с нагрузкой в положении сгибания под углом  $45^\circ$ , когда можно определить симптом заднего «провисания» большеберцовой кости [75].

Компьютерная томография в отношении диагностики повреждений крестообразных связок коленного сустава имеет примерно такое же значение, как и рентгенография, так как позволяет уверенно визуализировать только костные структуры [67].

Ультразвуковое исследование (УЗИ) позволяет проводить динамическое исследование степени стабильности коленного сустава в реальном времени, однако в отношении визуализации структуры крестообразных связок имеет сомнительную ценность, существенно уступая в этом магнитно-резонансной томографии [67]. С помощью УЗИ можно оценить угол наклона крестообразных связок, отек или рубцевание в местах их прикрепления, использовать для проведения динамических исследований, однако как основную диагностическую методику для определения состояния крестообразных связок УЗИ можно расценивать только в условиях недоступности МРТ [127]. Кроме того, УЗИ характеризуется значительной операторозависимостью, а, значит, обладает низкой повторяемостью [122].

Магнитно-резонансная томография (МРТ) позволяет проводить наиболее исчерпывающую визуальную оценку всех структур коленного сустава, определять состояние крестообразных связок и описывать сопутствующие травмы колена. В литературе подтверждено, что МРТ является высокоточным методом диагностики полных разрывов ПКС с чувствительностью 83-100% и специфичностью 96-100%, однако при диагностике частичных разрывов точность сканера МРТ 1,5 Тесла или более низкой силы поля составляет лишь от 25 до 53% [79]. Идентификация разрыва основана на наблюдении аномалий в самой связке, включая нарушение непрерывности ее волокон и наличие высокой интенсивности МР-сигнала [118]. Прямые признаки включают невозможность визуализации волокон связки на снимках (или прерывание волокон, видимое в двух различных плоскостях визуализации), другим признаком является наличие аномальной морфологии, характеризующейся нерегулярным или волнистым контуром ПКС или аномальной ориентацией ее волокон. Также описано несколько косвенных (вторичных) МРТ-признаков, таких как контузия мыщелков (аномальная интенсивность сигнала костного мозга, вызванная соударением задней поверхности плато большеберцовой кости и латерального мыщелка бедренной кости) и переднее смещение большеберцовой кости [79]. В 2014 году F.W. Roemer с соавт. [38] разработали систему оценки острых повреждений крестообразных связок и их дегенеративных изменений на основе МРТ – Anterior Cruciate Ligament

OsteoArthritis Score (ACLOAS), согласно которой выделяли 3 типа повреждений (Рисунок 1.1):

- 0 (норма) – равномерно гипоинтенсивный сигнал, нормальная толщина и сохраненная непрерывность связки;
- 1 – увеличенная толщина связки и/или повышенная интенсивность интралигаментарного сигнала при сохранении нормального хода и непрерывности;
- 2 – связка выглядит истонченной или удлинненной, но остается непрерывной;
- 3 – связка отсутствует или демонстрирует полную прерывистость.

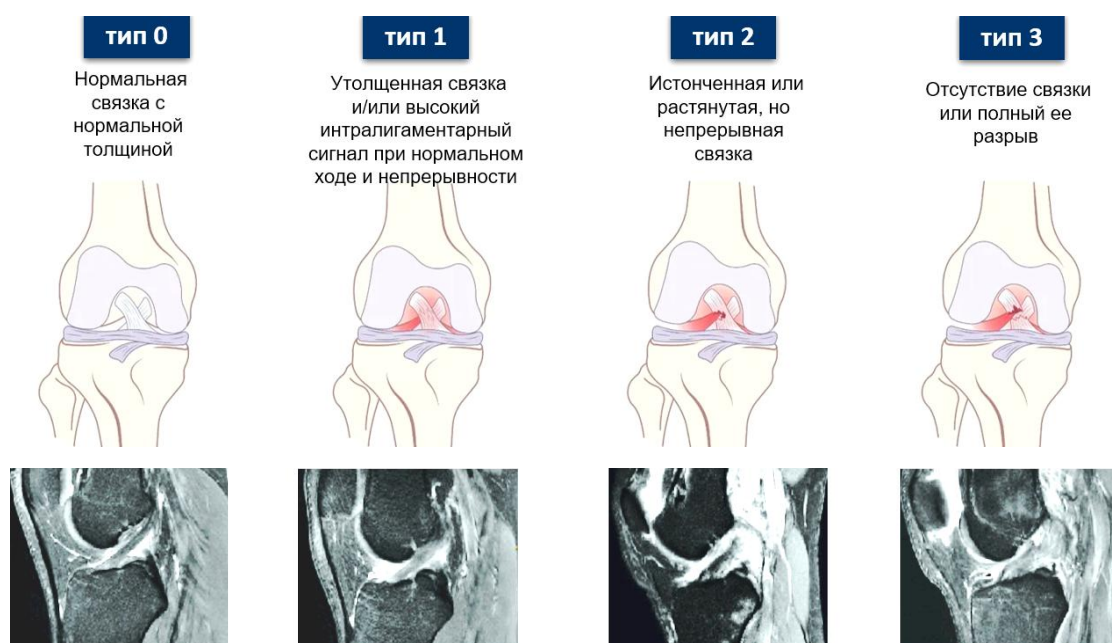


Рисунок 1.1 – МРТ классификация повреждений крестообразных связок (ACLOAS) [38]

При мукоидной дегенерации крестообразных связок на МРТ можно видеть толстые и плохо различимые волокна при сохраненных их ориентации и непрерывности. Признаками такой патологии считают промежуточную интенсивность сигнала на T1-взвешенных изображениях и высокую интенсивность сигнала на T2-взвешенных изображениях [82, 83]. Характерную картину отека и высокой интенсивности сигнала на МРТ описывают как «признак стебля сельдерея», однако четкого определения несомненных признаков мукоидной

дегенерации по данным МРТ не существует [82]. J.McIntyre с соавт. описали 10 пациентов, у которых на МРТ изначально был обнаружен разрыв ПКС, но при артроскопии было обнаружено мукоидное перерождение связки [76].

Артроскопия представляет собой малоинвазивную диагностическую и лечебную процедуру, обеспечивающую возможность непосредственной визуальной и тактильной инспекции компонентов сустава. Артроскопия признана референтным методом (золотым стандартом) в финишной диагностике повреждений крестообразных связок, позволяя с высокой точностью идентифицировать локализацию и степень повреждения связки [42, 47, 54]. Одной из наиболее распространенных является классификация Американской ассоциации хирургов-ортопедов (AAOS), включающей 3 степени повреждений крестообразных связок коленного сустава: I степень – незначительное растяжение с сохранением стабильности коленного сустава; II степень – частичное (парциальное) повреждение; III степень – тотальный (полный) разрыв (Рисунок 1.2).

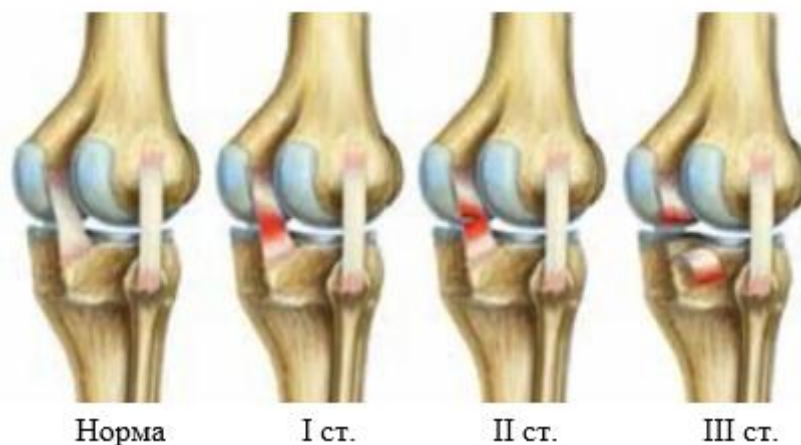


Рисунок 1.2 – Классификация AAOS [1]

Определить состояние крестообразных связок в соответствии с данной классификацией можно как при непосредственном инспектировании в ходе открытых операций, так и при артроскопической ревизии.

В то же время, несмотря на ряд преимуществ, артроскопия, как правило, требует анестезиологического обеспечения и пребывания пациента в стационаре, а также сопряжена с более значительными финансовыми затратами по сравнению с неинвазивными диагностическими процедурами [42, 54]. Следует отметить и потенциальный риск развития интра- и послеоперационных осложнений, а также провоцирование прогрессирования остеоартрита коленного сустава после артроскопического вмешательства, на что указывает ряд авторов. Послеоперационный период восстановления предполагает наличие болевого синдрома и необходимости использования дополнительных средств опоры (костылей), что предопределяет некоторый период временной нетрудоспособности [42, 47, 54]. К тому же диагностическая ценность метода зависит от квалификации и опыта хирурга. Исходя из вышесказанного, диагностическую артроскопию как самостоятельный метод исследования сегодня практически не применяют, а используют для уточнения диагноза в ходе первого, ревизионного, этапа артроскопического вмешательства, для определения показаний к которому диагноз устанавливают в предоперационном периоде с помощью неинвазивных методик [110]. Однако, даже артроскопия не позволяет с уверенностью верифицировать частичные подсиновиальные разрывы крестообразных связок, определить степень повреждений.

## 1.5. Лечение

Значение функциональной несостоятельности крестообразных связок заключается в существенном нарушении нормальной биомеханики коленного сустава, что приводит к повышенной уязвимости его структур перед длительными и повторяющимися нагрузками, а также хроническому болевому синдрому, неустойчивости в коленном суставе, мышечной гипотрофии, ограничению физической активности и снижению качества жизни. Для молодого и физически активного контингента пациентов такой режим является клинически и социально неприемлемым [24].

## Консервативное лечение

Некоторые исследования подтвердили, что консервативное лечение при определенных условиях может дать удовлетворительные результаты [19, 52]. При повреждении ПКС процесс заживления в некоторой степени происходит. Однако, даже после длительной внешней иммобилизации коленного сустава в течение 6-8 недель с разгрузкой на костылях, в зоне повреждения не формируется достаточного количества рубцовой ткани [112]. В любом случае без хирургического лечения колено остаётся недостаточно стабильным и подверженным повторным травмам [37, 52].

Лечение полных разрывов крестообразных связок, особенно ПКС, исследовано весьма подробно с общим мнением о необходимости хирургического реконструктивного вмешательства. Существенно меньше известно о результатах консервативного лечения частичных разрывов ПКС. В отношении лечения таких повреждений нет единого мнения, и тактика зависит от множества различных факторов (возраста, пола, уровня спортивной активности, наличия сопутствующих травм колена). Ряд авторов настаивает на берегающем подходе с целью сохранения проприорецепции, которая при протезировании связки исключается [17, 64].

Опубликованы данные, согласно которым консервативное лечение острых повреждений ЗКС без полного нарушения непрерывности эффективно и дает хорошие и отличные результаты [5, 9]. Основным консервативным подходом при изолированных разрывах ЗКС является длительная иммобилизация коленного сустава с применением туторных или шарнирных ортезов, обеспечивающих заднюю поддержку голени. В комплекс терапии входят также: использование дополнительной опоры на костыли, модификация нагрузок, прием нестероидных противовоспалительных препаратов, лечебная физкультура и физиотерапия. Однако нарушение нормальной биомеханики коленного сустава при дефекте ЗКС приводит к перераспределению контактных нагрузок между суставными поверхностями, появлению ротационной и вальгус-варус нестабильности. Эти



механические дисбалансы способствуют прогрессированию дегенеративных изменений суставного хряща, что в перспективе приводит к формированию вторичных остеоартрозных изменений в травмированном суставе [5, 8, 19].

### Оперативное лечение

На заре развития хирургии повреждений ПКС основным методом лечения ее полных разрывов являлось открытое восстановление (шов/реинсерция). С развитием артроскопической хирургии методом выбора стала артроскопическая пластика крестообразных связок с использованием преимущественно ауто трансплантатов [7, 27, 28, 29]. В последнее время появились сообщения о возврате к реинсерции ПКС при определенных вариантах повреждений [21, 23, 24, 26, 99].

Для реконструкции ПКС, ЗКС и других связок коленного сустава наибольшее распространение получили следующие ауто трансплантаты [3, 109]:

- из сухожилия надколенника с костными фрагментами (в настоящее время применяют редко);
- из сухожилия подколенной/полусухожильной мышцы;
- из сухожилия четырёхглавой мышцы бедра;
- из сухожилия длинной малоберцовой мышцы.

Аллогенные сухожильные трансплантаты применяют реже и считают приемлемым вариантом в случаях ревизионного лечения, а также у пациентов, не претендующих на участие в спортивных состязаниях, в том числе у пожилых [11, 27, 45].

Несмотря на большой массив публикаций, посвященных пластике поврежденной ПКС, данных о сравнительной оценке долгосрочных результатов таких операций с анализом клинических аспектов биологического приживления различных трансплантатов, еще недостаточно.

Еще М.П. Лисицын (2012) доказал, что результаты восстановления ПКС зависят не столько от выбора трансплантата, сколько от точности его

позиционирования. В то же время, несмотря на обилие применяемых методов, отличающихся видами трансплантатов, способами их подготовки, позиционирования и фиксации, а также вариантами хирургической техники, сформулированы общие принципы реконструкции ПКС:

- анатомичность реконструкции (максимально точное воспроизведение топографии и зон прикрепления нативной связки) [24];

- изометричность трансплантата (обеспечение стабильного натяжения в физиологическом объёме движений) [24];

- высокая прочность трансплантата, достаточная для выдерживания функциональных нагрузок до формирования биологической интеграции [20, 109];

- техническая простота и доступность операции [6, 24, 74];

- минимизация риска послеоперационных осложнений.

Следование перечисленным принципам служит основой для персонализированного выбора тактики реконструкции с учётом анатомических особенностей пациента, уровня физической активности и доступности ресурсов.

Сегодня нет единого подхода к путям соблюдения перечисленных принципов, что обусловило отсутствие единой приоритетной методики реконструкции ПКС. В ортопедических отделениях применяют разные подходы: используют вариативные техники формирования костных каналов, применяют ауто- и аллотрансплантаты, а также различные типы имплантов для их фиксации [10, 50].

Для реконструкции ЗКС описан ряд техник, которые отличаются по нескольким ключевым признакам:

- способ фиксации большеберцового трансплантата: традиционные методики включают формирование транстибиального туннеля и технику с формированием костного блока в заднем отделе большеберцовой кости («Inlay»);

- число пучков: применяются однопучковые и двухпучковые варианты реконструкции, ориентированные на воспроизведение анатомической структуры нативной связки;

– тип трансплантата: используются ауто трансплантаты, аллотрансплантаты и синтетические импланты, выбор которых определяется клиническими показаниями и доступностью материалов.

Аналогично реконструкции ПКС, единый консенсус относительно оптимальной методики фиксации и предпочтительного типа трансплантата для ЗКС отсутствует; выбор техники остаётся индивидуальным и зависит от данных пациента, хирургического опыта врача и ресурсов учреждения [5, 95, 121].

### **Послеоперационная реабилитация**

Реабилитация после пластики крестообразных связок имеет ключевое значение для восстановления функции коленного сустава и особенно для возвращения к занятиям спортом [70, 97]. Протоколы направлены на восстановление объёма движений, а также на восстановление атрофированных мышц без повреждения трансплантата. Даже при точной анатомической реконструкции невозможно ожидать хороших результатов без адекватной реабилитации [16, 95]. Хотя процесс ремоделирования/приживления трансплантатов у людей полностью не изучен, на основании результатов экспериментов на животных принято считать, что трансплантат проходит следующие этапы:

1. Некроз, деградация из-за потери клеток.
2. Ремоделирование, метаболическая гипертрофия с инвазией кровеносных сосудов и клеток.
3. Созревание, устойчивое состояние.

Стандартный протокол реабилитации длится 9 месяцев, его разделяют на следующие 4 фазы [111]:

- фаза I: период восстановления, до 6 недель после операции;
- фаза II: ранний тренировочный период, до 3 месяцев после операции;
- фаза III: поздний тренировочный период (эквивалентный фазе спортивной реабилитации), через 3-6 месяцев после операции;

– фаза IV: период возвращения к занятиям спортом, через 6 месяцев после операции.

## **1.6. Спектроскопия**

Спектроскопия представляет собой анализ взаимодействия между материей и электромагнитным излучением. Анализ спектра поглощения или излучения позволяет определить компонентный состав, структурную организацию и некоторые физические характеристики исследуемого образца. Существует группа спектроскопических методов, каждый из которых основан на использовании определенной области электромагнитного спектра (например, видимый диапазон, инфракрасное излучение, ультрафиолетовое излучение, рентгеновское излучение) и характеризуется специфическими областями применения. В медицине используют целый ряд спектроскопических методов, каждый из которых обладает своими уникальными возможностями.

### **Спектроскопия диффузного отражения**

Основной принцип СДО заключается в изучении взаимодействии света с биологической тканью посредством явлений рассеяния и поглощения. Характеристики поглощения ткани указывают на ее биохимический состав, тогда как свойства рассеяния связаны с субклеточной морфологией [22, 90, 124]. После взаимодействия с тканью спектр отраженного света изменяется относительно падающего света. Спектр диффузного отражения предоставляет информацию о композиционных и субклеточных свойствах исследуемой ткани. Данный метод уже зарекомендовал себя в онкологии – интеграция технологии СДО в хирургический инструментарий, такой как хирургический скальпель или биопсионные иглы, может предоставить хирургу дополнительные данные, отражающие гистопатологию ткани. Эта информация может помочь хирургу определить оптимальную степень резекции для удаления опухолей различной

локализации или наиболее точно выполнить биопсию [90, 124]. Помимо онкологии, СДО используют и для других клинических целей. Так, например, оптические волокна были интегрированы в спинальные иглы для подтверждения локализации кончика иглы в эпидуральном пространстве. Основываясь на общем количестве липидов, оцениваемом с помощью СДО, эпидуральное пространство можно точно идентифицировать и отличить от окружающих тканей, таких как желтая связка или спинномозговая жидкость [46]. Также метод СДО был успешно применен для ранней диагностики остеоартрита при интраоперационных измерениях [4, 13, 15, 18, 65, 78, 115].

### **Рамановская спектроскопия**

Рамановская спектроскопия впервые была описана К. В. Раманом в 1928 году, который идентифицировал рассеянные фотоны, демонстрирующие сдвиг длины волны относительно падающего света. В РС монохроматический лазерный источник освещает образец, вызывая фотонно-молекулярные взаимодействия, которые могут приводить к потере энергии (стоксово рассеяние) или приобретению энергии (антистоксово рассеяние) рассеянными фотонами [14, 125]. Обмен энергией возбуждает определенные молекулярные колебания, генерируя Рамановский спектр, в котором каждая молекула демонстрирует характерный рисунок, соответствующий ее составным функциональным группам [101]. Этот метод позволяет идентифицировать и характеризовать молекулярный состав и структуру материалов. РС чувствительна к изменениям в конформации и составе клеток, тканей, дезоксирибонуклеиновой кислоты (ДНК), белков и липидов [49]. Преимуществами РС являются ее неразрушающая природа, быстрое время сбора данных, возможность анализа на молекулярном уровне, пригодность для анализа водных растворов из-за слабого рассеяния Рамана водой. Согласно исследованию М. G. Ramírez-Elías et F. J. González, основные ограничения РС возникают из-за слабости сигнала Рамана и наличия фонового шума в биологических образцах [103].

Многочисленные исследования посвящены изучению применения РС для обнаружения химических изменений в злокачественных опухолях [40, 49]. В нескольких исследованиях изучены Рамановские спектры тканей молочной железы [33, 55]. Чтобы преодолеть ограничения, связанные с потерей времени на культивирование болезнетворных бактерий, участились попытки применить РС для диагностики инфекционных заболеваний *in situ* [12, 105]. РС демонстрирует высокий потенциал для выявления ранней стадии болезни Альцгеймера и ее дифференциации от поздних форм заболевания, поскольку она хорошо подходит для анализа образцов, содержащих воду [102]. С. Carlomagno с соавт. сообщили об успешном применении РС с использованием машинного обучения для идентификации болезни Паркинсона [66].

### **Инфракрасная (ИК) спектроскопия**

Истоки ИК-спектроскопии восходят к 1800 году, когда астроном Уильям Гершель открыл инфракрасную область электромагнитного спектра, расположенную за красной границей видимого диапазона [125]. ИК-спектроскопия обеспечивает качественный и количественный анализ структуры широкого спектра соединений. Метод основан на поглощении или отражении инфракрасного излучения в диапазоне от 1 до 1000 мкм, и делится на три типа ИК: ближний ИК (БИК) в области 0,76-2,5 мкм, средний ИК (СИК) в области 2,5-25 мкм и дальний ИК (ДИК) за пределами 25 мкм.

Поглощение в БИК-диапазоне происходит из-за обертонов и комбинаций валентных и деформационных колебаний связей O-H, C-H, N-H и S-H, которые являются основными молекулярными связями в органических материалах [4, 25, 86]. С помощью спектроскопии в БИК диапазоне была изучена речь у детей и взрослых, когнитивная неврология, активация коры головного мозга во время двигательных задач [4]. Из-за более короткой длины волны БИК обладает большей энергией, чем СИК и ДИК, поэтому излучение может проникать в слои толщиной

до нескольких миллиметров. Это делает метод идеальным для медицинских применений [2, 4].

СИК является общепризнанным и надежным методом, с помощью которого можно идентифицировать и количественно определять различные соединения. Область СИК  $4000-400\text{ см}^{-1}$  часто используют для биологических исследований липидов, белков, амидов, углеводов и нуклеиновых кислот.

Спектроскопия ДИК ( $400-20\text{ см}^{-1}$ ) предоставляет информацию о высокоупорядоченных структурах, таких как фибриллярные структуры и белки, поскольку она более чувствительна к колебаниям пептидных скелетов и водородных связей, чем СИК [39, 125].

### **Магнитно-резонансная спектроскопия (МРС)**

МРС *in vivo* может быть применена в качестве метода, дополняющего МРТ. Обе методики основаны на физическом явлении ядерного магнитного резонанса, которое в МРТ используется для формирования пространственных изображений, а в МРС – для количественного определения концентраций ключевых метаболитов [4]. МРТ стала важнейшим методом как для исследовательских, так и для клинических применений; однако этому исследованию часто не хватает специфичности в характеристике основных патологических процессов. Во многих случаях окончательный диагноз требует микроскопической оценки образцов тканей, полученных с помощью биопсии или аутопсии. Напротив, МРС может достичь более высокой степени диагностической специфичности благодаря своей способности обнаруживать биохимические изменения, связанные с определенными болезненными состояниями, что позволяет получать количественные характеристики и осуществлять мониторинг физиологических состояний [114]. Применение МРС в медицине было инициировано работой Радды и впоследствии развито М.Д.Дэвсоном с соавт. МРС позволяет количественно оценить биоэнергетику мышц, включая концентрации креатинфосфата и аденозинтрифосфата (АТФ), а также внутриклеточного рН. Этот метод

использовался для характеристики изменений в данных метаболитах во время упражнений как в здоровой, так и в патологически пораженной мускулатуре руки человека [51, 89]. В области медицины МРС дает преимущество в выявлении новообразований, гематом и других патологических состояний. Учитывая диагностические проблемы, связанные с рассеянным склерозом, МРС стал полезным методом визуализации для его обнаружения. МРС особенно полезен для визуализации определенных анатомических областей, таких как мозг, где он дает изображения с высоким разрешением и четкими границами, которые эффективно различают серое и белое вещество. Кроме того, метод продемонстрировал эффективность в раннем выявлении карциномы молочной железы [88].

### **Фотоакустическая спектроскопия (ФАС)**

Фотоакустический эффект был впервые описан А. Беллом в 1880 году [126]. Принцип заключается в облучении ткани световым лучом, при котором фотоны проникают на определенную глубину и подвергаются рассеянию и поглощению эндогенными или экзогенными хромофорами [93]. Поглощенная оптическая энергия впоследствии преобразуется в тепловую, что приводит к быстрому увеличению локального давления и генерации акустических волн, которые распространяются к поверхности ткани, где их можно обнаружить [43]. Технология ФАС использует акустические методики для определения оптического спектра поглощения образцов. В отличие от обычных спектроскопических методов, ФАС смягчает проблемы, связанные с рассеянием света, отражением и фоновыми помехами. Как исследовательский инструмент, ФАС широко применяют при анализе твердых тел, газов и жидкостей в различных отраслях, включая биологию, физику, материаловедение и медицину [87]. ФАС объединяет высокую контрастность, присущую оптическим методам, с превосходной глубиной проникновения, характерной для акустических методов, что делает ее особенно подходящей для исследования биологических тканей, демонстрирующих неоднородные оптические свойства, но относительно однородные акустические



характеристики. Этот способ находит широкое применение в обнаружении веществ в тканях и органах как животных моделей, так и людей, включая такие приложения, как мониторинг уровня глюкозы в крови, измерение насыщения крови кислородом, визуализация атеросклероза и обнаружение неопластических клеток. Еще одним преимуществом ФАС является ее способность непосредственно определять амплитуду и фазу фотоакустического сигнала от целевого аналита без необходимости предварительной обработки. Это не только упрощает экспериментальную процедуру, но и сохраняет нативное состояние образца, сводя к минимуму потенциальные биологические повреждения и одновременно облегчая получение более точных аналитических данных [87].

### **Флуоресцентная спектроскопия**

ФС – это вид спектроскопии, которая анализирует флуоресценцию, испускаемую образцом. Образец возбуждается с помощью падающего светового луча, который вызывает испускание света на более низком энергетическом уровне, в результате чего получается спектр испускания, служащий основой для интерпретации данных. Благодаря успешному внедрению в различных областях медицинских наук, ФС считают высокочувствительной методикой, которая может стать более надежным и эффективным диагностическим инструментом по сравнению с традиционными методами [30, 63]. Наличие многочисленных эндогенных хромофоров в тканях организма облегчает прямое использование ФС в качестве диагностического метода для ряда патологий. Эти хромофоры, которые могут присутствовать в повышенных концентрациях из-за патологических процессов или существовать в нормальном физиологическом состоянии, включают никотинамидадениндинуклеотид, коллаген, эластин, порфирины и каротиноиды. Флуорофоры вносят вклад в характерный спектр излучения, который, наряду с другими спектральными параметрами, используют для интерпретации результатов диагностики [107]. Исследования демонстрируют, что применение методов диагностики, основанных на регистрации флуоресцентного излучения, может

существенно повысить эффективность ранней диагностики опухолей различных локализаций. Важной задачей в рамках применения биофотоники в хирургии является поиск новых диагностических критериев для морфологической верификации новообразований [30, 71, 73]. В настоящее время метод имеет ряд ограничений, связанных с тем, что флуорофоры имеют близкие или перекрывающиеся области поглощения флуоресценции. В связи с этим существуют сложности как с определением длины волны возбуждения для каждого конкретного флуорофора, так и с определением длины волны флуоресценции. Кроме того, флуоресценция тканей зависит от температуры и неоднородности каждого исследуемого образца [31].

### **Резюме**

Существующие традиционные методы оценки состояния крестообразных связок не обеспечивают хирурга исчерпывающими сведениями об их биомеханической и структурной состоятельности даже при использовании таких наиболее информативных исследований как МРТ и артроскопия. Вместе с тем, такая информация может оказаться критически важной для выбора оптимальной лечебной тактики, особенно при частичных повреждениях ПКС и ЗКС, когда возможность успешной реабилитации без протезирования связки зависит от сохранности ее структурных и функциональных элементов. Сомнения в целесообразности замены крестообразных связок при их частичном повреждении трансплантатами обусловлены невозможностью при таком радикальном подходе сохранения проприоцепции, которая играет ключевую роль в восстановлении динамической стабилизации сустава и снижении риска повторной нестабильности. Поэтому получение максимально полноценной информации о состоянии крестообразных связок важно для принятия решения о том, насколько имеющаяся патология критична для последующего восстановления функции без большой реконструктивной операции. В связи с этим разработка и внедрение высокоточных количественных диагностических методик позволит применить

персонализированный подход к определению тактики лечения и улучшить его результаты.

Оптические методы спектроскопии представляют собой перспективное направление для повышения точности диагностики: они способны количественно выявлять те субклинические изменения в ткани крестообразных связок, которые остаются нераспознанными при оценке с помощью традиционных методик (МРТ, артроскопия).

Анализ литературных источников с описанием возможностей применения различных методик спектроскопии для исследования биологических тканей показал, что для интраоперационной оценки состояния крестообразных связок коленного сустава наиболее перспективными представляются спектроскопия диффузного отражения, Рамановская спектроскопия и флуоресцентная спектроскопия. Каждая из них позволяет характеризовать ткань по специфическим оптическим показателям, что обеспечивает дифференциацию нормальной, деградированной и частично повреждённой связочной ткани, включая стадии мукоидной дегенерации. Спектроскопические данные при этом отражают не только грубые морфологические изменения, но и способны детектировать клеточные изменения – состав коллагена, протеогликанов, воды и липидов.

Однако в настоящее время отсутствуют отработанные методики применения оптической спектроскопии для диагностики состояния крестообразных связок коленного сустава в условиях оперативного вмешательства, сообщения о проведенных в этом направлении исследованиях единичны и неоднозначны. Требуется выбор наиболее эффективной спектроскопической методики, создание с ее помощью диагностического протокола и на основе данных такой уточненной диагностики – рабочей классификации повреждений крестообразных связок коленного сустава, ориентированной на выбор оптимальной лечебной тактики.

Указанные обстоятельства и послужили обоснованием актуальности предпринятого исследования.

## ГЛАВА 2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Перспективное нерандомизированное исследование проводили в Клинике травматологии, ортопедии и патологии суставов Университетской клинической больницы №1 ФГАОУ ВО Первый МГМУ им. И.М. Сеченова Минздрава России (Сеченовский Университет) на базе кафедры травматологии, ортопедии и хирургии катастроф Института клинической медицины им. Н.В. Склифосовского в период с 2023 по 2025 гг. План исследования одобрен этическим комитетом ФГАОУ ВО Первый МГМУ им. И.М. Сеченова Минздрава России (Сеченовский Университет) (протокол №23-23 от 01.12.2023).

### 2.1. Дизайн исследования

Настоящее исследование было разделено на два последовательных этапа – экспериментальный и клинический. До включения в исследование все пациенты были подробно информированы о его целях, задачах, а также условиях обеспечения конфиденциальности и неразглашения персональных данных. Подписание информированного согласия осуществлялось в двух экземплярах, один из которых передавали пациенту.

#### Экспериментальный этап

Задачами проведения экспериментального этапа исследования явились:

- определение методики спектроскопии, обладающей наибольшей информативностью в отношении выявления патологии крестообразных связок коленного сустава;
- создание рабочей классификации повреждений крестообразных связок на основе уточненных данных, полученных с помощью спектроскопического исследования;

– разработка алгоритма выбора оптимальной лечебной тактики с учетом данных спектроскопии.

Для отбора пациентов к участию в экспериментальном этапе исследования проводили скрининг среди совершеннолетних пациентов (старше 18 лет), имевших показания к тотальному эндопротезированию коленного сустава и поступивших в нашу клинику для проведения такой операции. Всем пациентам в предоперационном периоде было выполнено МРТ-исследование, на основании которого диагностированы повреждения хотя бы одной крестообразной связки коленного сустава, соответствующее 1-2 типам по классификации ACLOAS. Пациентов с полным разрывом, а также с отсутствием патологии крестообразных связок по данным МРТ, не включали в исследование.

В ходе операции проводили визуальный контроль состояния крестообразных связок, оценивая его по классификации AAOS, и при необходимости внося коррективы в предоперационный диагноз. При выполнении операции тотального эндопротезирования коленного сустава осуществляли забор эксплантов ПКС и ЗКС (техника этой манипуляции будет описана ниже), которые впоследствии подвергали спектроскопическому исследованию. Допущенные при взятии эксплантов технические погрешности, не позволившие получить эксплант, пригодный для полноценного исследования, явились критерием невключения.

Оптические параметры эксплантов определяли посредством анализа полученных спектров совместно с коллегами из лаборатории клинической биофотоники Института регенеративной медицины ФГАОУ ВО Первый МГМУ им. И.М. Сеченова Минздрава России (Сеченовский Университет). Использовали три вида спектроскопии, которые, по данным литературы, могли бы в наибольшей степени соответствовать поставленным перед нашим экспериментом задачам: спектроскопию диффузного отражения, Рамановскую спектроскопию и флуоресцентную спектроскопию.

На основе полученных при спектроскопии данных была создана рабочая классификация, которая легла в основу алгоритма выбора оптимальной лечебной тактики (Рисунок 2.1).

Всего в ходе экспериментального этапа были исследованы 30 эксплантов ПКС и ЗКС, взятых у 24 пациентов.

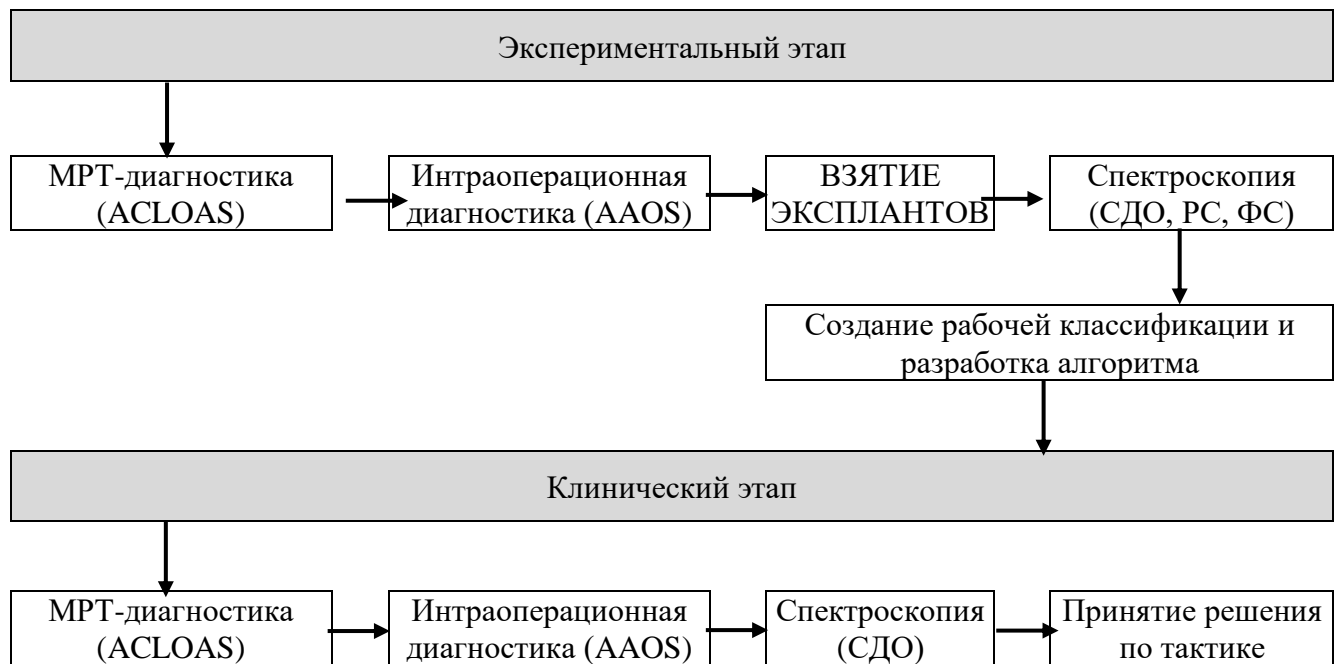


Рисунок 2.1 – Дизайн исследования

### Клинический этап исследования

Разработанную методику уточненной диагностики повреждений крестообразных связок коленного сустава с помощью СДО, основанные на полученных при этом данных рабочую классификацию и алгоритм выбора лечебной тактики применили в клинической практике у 15 пациентов со сроком давности после получения травмы не позднее 6 недель, которым выполняли артроскопические вмешательства на коленном суставе, и у которых по данным МРТ крестообразные связки или были интактны, или имели повреждения 1-2 типа по классификации ACLOAS. В ходе диагностического этапа артроскопии состояние крестообразных связок уточняли по классификации AAOS, после чего выполняли их спектроскопическое исследование с помощью СДО, на основе чего и определяли лечебную тактику в соответствии с разработанным алгоритмом. Результаты оценивали через 1 год по шкалам ВАШ (боль), KOOS, IKDS и Lysholm.

## 2.2. Взятие эксплантов и их характеристика

Исследуемые экспланты ПКС и ЗКС были получены в рамках планового оперативного вмешательства – первичного тотального эндопротезирования коленного сустава. Непосредственно в ходе операции проводили оценку состояния связок в соответствии с классификацией AAOS.

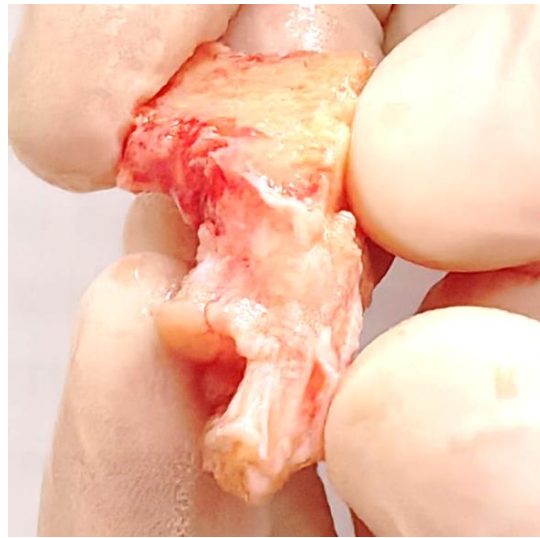
Образцы крестообразных связок изымали единым блоком совместно с костными точками прикрепления для обеспечения структурной целостности и возможности оптической оценки состояния зон прикрепления. После каждого оперативного вмешательства проводили обязательную верификацию эксплантов на предмет ятрогенных повреждений, полученных в процессе эксплантации, с целью исключения артефактов при дальнейших измерениях. Поврежденные экспланты не включали в исследование.

Предоперационную оценку состояния крестообразных связок, основанную на данных МРТ (классификация ACLOAS) сравнивали с результатами их непосредственной интраоперационной инспекции (классификация AAOS). При этом учитывали, что 1 тип по классификации ACLOAS соответствует I степени повреждения связки по классификации AAOS (незначительные изменения с сохранением стабильности), 2 тип по ACLOAS – II степени по AAOS (парциальное повреждение с частичным нарушением функции), и 3 тип по ACLOAS – III степени по AAOS (полный разрыв).

Несмотря на то, что в экспериментальный этап исследования включали только тех пациентов, у которых при предоперационном МРТ-исследовании выявляли повреждения только 1 и 2 типов по классификации ACLOAS, все же в некоторых случаях интраоперационно, используя классификацию AAOS, выявляли повреждения и III степени, то есть полный разрыв (Рисунки 2.2 и 2.3).



I степень



III степень

Рисунок 2.2 – Экспланты ПКС: повреждения по классификации AAOS



I степень



III степень

Рисунок 2.3 – Экспланты ЗКС: повреждения по классификации AAOS  
(фото автора)

Взятые экспланты обильно промывали в стерильном контейнере физиологическим раствором хлорида натрия ( $\text{NaCl} - 0,9\%$ ) для удаления остаточных следов крови и синовиальной жидкости, которые могли бы внести искажения в спектральные измерения. Для предотвращения дегидратации (высыхания) биологического материала в контейнер заливали небольшое количество фосфатного буферного раствора (PBS).



У каждого пациента стремились взять 2 экспланта (ПКС и ЗКС), однако в ходе их забора некоторые были повреждены (в основном вследствие погрешности техники), в связи с чем исследованию подверглись 30 эксплантов, взятых у 24 пациентов.

При их визуальной и тактильной инспекции предоперационный диагноз, основанный на данных МРТ, был уточнен в 5 случаях (22,7%) – преимущественно в сторону отягощения повреждений. Как уже говорилось, в экспериментальный этап включали тех пациентов, у которых в предоперационном периоде на основании данных МРТ были определены только повреждения крестообразных связок лишь 1 и 2 типов по классификации ACLOAS. Однако, при непосредственной оценке для 7 ПКС, состояние которых, по данным МРТ было определено соответствующим 1 типу повреждений, в двух случаях (28,6%) повреждений ПКС не выявлено, а еще в одном случае (14,3%) повреждение соответствовало более тяжелой, II степени по классификации AAOS. Из тех 15 ПКС, состояние которых по классификации ACLOAS было определено как повреждение 2 типа, интраоперационная оценка была более тяжелой (III степень по AAOS) в трех наблюдениях (20,0%). Для состояния ЗКС предварительный диагноз пришлось скорректировать только в одном случае, когда вместо 2 типа повреждения по ACLOAS была определена III степень по AAOS (12,5%) (Таблица 2.1).

Таблица 2.1 – Степень повреждений крестообразных связок, определенная по эксплантам

Вид экспланта	Классификация	Норма	1 тип/I ст	2 тип/II ст	3 тип/III ст	Всего
ПКС	ACLOAS	--	7	15	--	<b>22</b>
	AAOS	2	4	13	3	
ЗКС	ACLOAS	--	6	2	--	<b>8</b>
	AAOS	--	6	1	1	

После завершения всех экспериментальных процедур биологический материал был утилизирован в соответствии с установленными требованиями к медицинским отходам класса Б.

### 2.3. Спектроскопические исследования

Для сравнения диагностических возможностей в отношении определения состояния крестообразных связок коленного сустава были применены 3 методики: спектроскопия диффузного отражения, Рамановская спектроскопия и флуоресцентная спектроскопия.

С помощью этих методик исследовано 30 эксплантов, взятых в ходе первичного тотального эндопротезирования коленного сустава. На каждом экспланте было выделено 9 репрезентативных точек для получения спектров (Рисунок 2.4):

- 3 точки в области бедренного энтеза;
- 3 точки в средней части связки;
- 3 точки в области большеберцового энтеза.

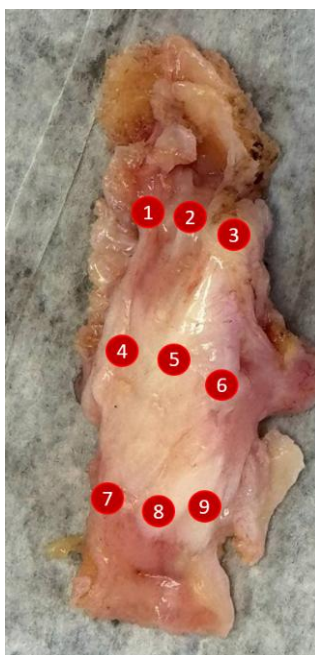


Рисунок 2.4 – Точки получения спектров на примере экспланта ПКС (фото автора)

Каждое измерение повторяли 2-3 раза. Таким образом, общий объём данных соответствовал 270 исследованным участкам крестообразных связок. Было проанализировано более 750 различных спектров. Спектроскопические исследования эксплантов проводили непосредственно после экцизии.

### Спектроскопия диффузного отражения

Метод СДО базируется на анализе процессов рассеяния и поглощения света в биологической ткани. Регистрируемый спектр диффузного отражения ( $R(\lambda)$ ) определяется концентрацией основных тканевых хромофоров и оптическими свойствами рассеивающих структур (главным образом, фибрилл коллагена). В крестообразных связках ключевыми хромофорами являются вода и коллаген.

Для регистрации спектров СДО был применен зонд собственной разработки, включавший три оптоволоконных проводника. Один проводник служил для подачи широкополосного излучения на образец, два других проводника служили приёмниками света, испытавшего рассеяние и поглощение в толще исследуемого экспланта (Рисунок 2.5).

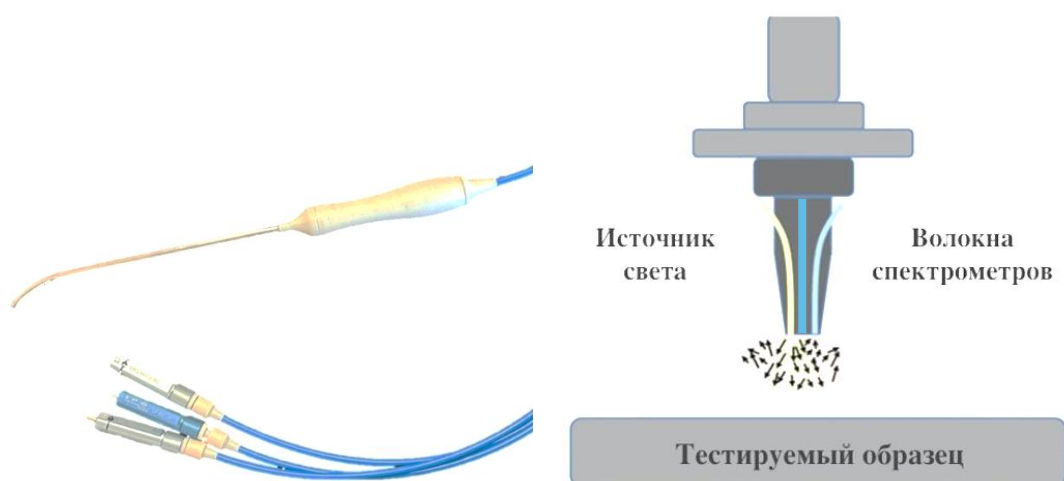


Рисунок 2.5 – Приёмно-передающий зонд и схема его применения

В качестве источника света использовали вольфрам-галогеновую лампу со сплошным спектром излучения (Thorlabs, Германия). Регистрацию отклика

осуществляли в расширенном диапазоне 800-1800 нм с использованием двух спектрометров (Рисунок 2.6):

1. QE2000pro (OceanOptics, США) для диапазона 800-1050 нм (ближний инфракрасный диапазон).

2. AvaSpec-NIR256-2.5-HSC (Avantes BV, Нидерланды) для диапазона 1050-1800 нм (средний инфракрасный диапазон).



Рисунок 2.6 – Общий вид оборудования для выполнения СДО (фото автора)

Для обеспечения достоверности измерений перед каждой серией экспериментов проводили калибровку – измеряли эталонный спектр лампы от стандарта диффузного отражения (белый эталон) и регистрировали фоновый спектр. После этого рассчитывали спектр отражения ( $R(\lambda)$ ) по формуле:

$$R(\lambda) = \frac{I - I_{bg}}{I_{ref} - I_{bg}}, \quad (2.1)$$

где  $I$  – спектр сигнала,  $I_{bg}$  – фоновый спектр,  $I_{ref}$  – эталонный спектр лампы.

По результатам измерения спектров отражения ( $R(\lambda)$ ) рассчитывали спектр эффективного поглощения ( $OD(\lambda)$ ) по формуле:

$$OD(\lambda) = -\log_{10} R(\lambda). \quad (2.2)$$

Из полученного спектра эффективного поглощения определяли оптические параметры.

### Рамановская спектроскопия

Метод Рамановской спектроскопии основан на эффекте неупругого (Рамановского) рассеяния монохроматического лазерного излучения на молекулах вещества. При этом анализируют разницу частот падающего и регистрируемого излучения (Рамановский сдвиг), где каждый пик соответствует определенному типу молекулярного колебания. Это позволяет получить «молекулярный отпечаток» химического состава ткани (коллаген, липиды, белки, гликозаминогликаны) и оценить степень структурных изменений (например, дефектный/функциональный коллаген).

Основные полосы Рамановского рассеяния для молекул, содержащихся в связках, известны и описаны в литературе [42] (Таблица 2.2).

Использовали источник света с длиной волны 690 нм при комнатной температуре ( $25 \pm 2$  °C). Система линз и зеркал направляла пучок излучения в центр одного из двух оптических волокон. Затем сигнал образца собирался вторым волокном и через коллиматор и полосовой фильтр подавался на входную щель монохроматора.

Таблица 2.2 – Основные полосы Рамановского рассеяния для молекул, содержащихся в связках: по Casal-Beiroa P. С соавт. [80]

Пик ( $\text{cm}^{-1}$ )	Молекулярное колебание	Молекулярный компонент	Ткань сустава
850-880	C-C	Коллаген	Хрящ, синовиальная жидкость, сухожилие, связка, мениск
920-2	C-C	Коллаген	Хрящ, синовиальная жидкость, сухожилие, связка

Продолжение Таблицы 2.2

Пик (см <sup>-1</sup> )	Молекулярное колебание	Молекулярный компонент	Ткань сустава
937-40	C-C	Белки	Хрящ, сухожилие, связка
1001-4	Ароматическое	Белки	Хрящ, синовиальная жидкость, сухожилие, связка, мениск
1060-4	OSO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Сульфатированные ГАГ, ПГ	Хрящ, связка, сухожилие
1240	C-N	Дефектный коллаген	Хрящ, синовиальная жидкость, сухожилие, связка, мениск, субхондральная кость, кость
1270		Функциональный коллаген	
1370	COO <sup>-</sup>	Гиалуроновая кислота, ГАГ, ПГ	Хрящ, синовиальная жидкость, сухожилие, связка
1439	=CH <sub>2</sub>	Липиды	Хрящ, сухожилие, связка, субхондральная кость, кость
1441-60	CH <sub>2</sub>	Липиды и белки	Хрящ, сухожилие, связка, мениск, субхондральная кость, кость
1630-1690	C=O	Коллаген и другие белки	Хрящ, сухожилие, связка, мениск, субхондральная кость, кость
2845-980	CH <sub>2</sub>	Липиды	Хрящ, синовиальная жидкость, сухожилие, связка, субхондральная кость, кость
2930	CH <sub>3</sub>	Липиды и белки	Хрящ, синовиальная жидкость, сухожилие, связка, субхондральная кость, кость

Спектры рамановского рассеяния регистрировали в диапазоне 2600-3800 см<sup>-1</sup> с помощью монохроматора M266 (решетка 600 штрихов/мм, SOL Instruments Ltd., Минск, Беларусь), оснащенного камерой с зарядовой связью (ПЗС-детектор) с обратной засветкой в ближнем ИК-диапазоне, глубоко обедненным слоем и термоэлектрическим охлаждением (iDus 416, Andor Technology, Белфаст, Северная Ирландия, Великобритания). Монохроматор и ПЗС-детектор работали под управлением программного обеспечения Solar Lab, разработанного компанией SOL Instruments Ltd (Минск, Беларусь). Спектры регистрировали при интенсивности лазерного излучения на поверхности ткани около 500 мВт, время измерения каждого спектра составляло 3 секунды. Ширина входной щели монохроматора составляла 100 мкм (Рисунок 2.7).



Рисунок 2.7 – Общий вид установки для Рамановской спектроскопии

### Флуоресцентная спектроскопия

Флуоресцентная спектроскопия позволяет оценить концентрацию и структурное состояние эндогенных флуорофоров ткани, таких как коллаген, эластин, протеогликаны и продукты их деградации. Изменение свойств и концентрации этих молекул являются прямым индикатором патологических изменений (дегенерации) в соединительной ткани.

Излучение от плазменного источника света (XWS-65, 400-1000 нм, мощность 20 Вт, Троицкий инженерный центр, Россия) проходило через оптическое волокно диаметром 550 мкм (NA 0,22, Ocean Optics, Данидин, Флорида, США), которое было подключено к входному порту монохроматора (диапазон перестройки 300-700 нм, OceanOptics MonoScan2000, Данидин, Флорида, США). С его помощью выделялась полоса излучения шириной 10 нм (диапазон перестройки 280-480 нм с шагом 20 нм). Излученный монохроматором свет доставлялся по оптоволокну (диаметр сердцевины 550 мкм, NA 0,22, IPG Photonics, Оксфорд, Миссисипи, США) к образцу для возбуждения флуоресценции. Для регистрации флуоресценции использовали второе волокно (диаметр сердцевины 550 мкм, числовая апертура 0,22, IPG Photonics, Оксфорд, штат Миссисипи, США). Волокна устанавливали в специальный держатель, обеспечивая их симметричное расположение относительно вертикальной оси. Такое расположение обеспечивало угол между волокнами  $30^\circ$ . Полученный сигнал регистрировали спектрометром

(USB 2000, Ocean Optics, Данидин, штат Флорида, США; спектральное разрешение 0,5 нм).

Флуоресцентные свойства исследовали на различных длинах волн в диапазоне возбуждения от 325 до 450 нм. Измерения проводили при стандартизированных условиях: температура  $22 \pm 1$  °С.

## **2.4. Клиническое применение разработанной методики**

### **Артроскопические операции**

На основе данных экспериментального этапа были разработаны рабочая классификация повреждений крестообразных связок коленного сустава, учитывающая данные спектроскопического обследования, а также алгоритм выбора лечебной тактики. В исследование включали пациентов, которым была показана артроскопическая операция на коленном суставе по поводу различной патологии интраартикулярных структур: повреждение менисков, болезнь Гоффа, антеромедиальная нестабильность коленного сустава. Не включали в исследование пациентов с внутрисуставными переломами, выраженными деформациями (врожденными или приобретенными) целевой нижней конечности, а также очевидные случаи полного разрыва крестообразных связок, подтвержденных клинически (выраженная нестабильность) и по данным МРТ. Всего было прооперировано 15 пациентов. Выполняли артроскопию под спинальной анестезией по стандартной методике с использованием артроскопического оборудования Smith & Nephew plc (Уотфорд, Соединённое Королевство Великобритания) На первом, диагностическом, этапе операции помимо традиционного инспектирования состояния крестообразных связок проводили уточненную диагностику с помощью СДО по описанной выше методике и в зависимости от результатов выполняли или не выполняли пластику крестообразных связок с последующим проведением реабилитационного периода, предусмотренного алгоритмом.



## Реабилитационный период

Протоколы реабилитации пациентов соответствовали широко распространенной клинической практике и были основаны на Клинических рекомендациях РФ «Повреждения связок коленного сустава» (2024 г.), разработанных Ассоциацией травматологов-ортопедов России и Общероссийской общественной организацией «Союз реабилитологов России». Выделяли три варианта реабилитационного периода после выполненной артроскопии в зависимости от степени повреждения крестообразных связок.

Протокол № 1 (традиционный) включал в себя ходьбу с дополнительной опорой на костыли в течение 1,5 недель с момента операции с дозированной нагрузкой на оперированную ногу – начиная с 50% от массы тела и постепенным увеличением нагрузки до полной. Самостоятельная гимнастика: сгибание-разгибание стоп (10-15 повторений за цикл, 3-4 цикла в сутки); подъем выпрямленной в коленном суставе ноги (7-10 повторений за цикл, 3-4 цикла в сутки). Курс ЛФК под контролем реабилитолога – с 3-й недели – укрепление передней и задней групп мышц бедра, активные сгибания-разгибания в прооперированном коленном суставе. Через 6 недель с момента операции – внутрисуставное введение препаратов гиалуроновой кислоты.

Протокол № 2 (усиленный) включал в себя внешнюю иммобилизацию полужестким ортезом и ходьбу с дополнительной опорой на костыли без нагрузки на оперированную ногу в течение 4 недель с момента операции, затем ходьба с дозированной нагрузкой на оперированную ногу 2 недели – начиная с 50% от массы тела с постепенным увеличением нагрузки. Далее (через 6 недель после операции) – полная опора на оперированную ногу. Самостоятельная гимнастика: сгибание-разгибание стоп (10-15 повторений за цикл, 3-4 цикла в сутки); подъем выпрямленной в коленном суставе ноги (7-10 повторений за цикл, 3-4 цикла в сутки); мануальная мобилизация надколенника (с 1-й недели после операции); активные сгибания-разгибания в коленном суставе (7-10 повторений за цикл, 3-4 цикла в сутки, начиная с 5 недели после операции). Курс ЛФК под контролем

реабилитолога – с 3-й недели укрепление передней и задней групп мышц бедра, пассивные сгибания-разгибания в коленном суставе. Через 6 недель с момента операции внутрисуставное введение препаратов гиалуроновой кислоты.

Протокол № 3 (после пластики крестообразных связок) не отличался от общепринятого и включал в себя иммобилизацию оперированной конечности шарнирным регулируемым ортезом: 1-2 неделя – 0-20°, 3 неделя – 0-30°, 4 неделя – 0-90°, 5 неделя – 0-105°, 6 неделя – 0-120°. Ходьба с дополнительной опорой на костыли без нагрузки на оперированную ногу в течение 4 недель с момента операции, затем – ходьба с дозированной нагрузкой на оперированную ногу в течение 2 недель (начиная с 50% от массы тела) с постепенным увеличением нагрузки. Полная опора на оперированную ногу – через 6 недель после операции. Самостоятельная гимнастика: сгибание-разгибание стоп (10-15 повторений за цикл, 3-4 цикла в сутки); подъем выпрямленной в коленном суставе ноги (7-10 повторений за цикл, 3-4 цикла в сутки); мануальная мобилизация надколенника (с 1-й недели после операции); активные сгибания-разгибания в коленном суставе (7-10 повторений за цикл, 3-4 цикла в сутки). Через 6 недель с момента операции – внутрисуставное введение препаратов гиалуроновой кислоты.

Этот же протокол считали показанным и при верификации полного изолированного разрыва ЗКС, в том числе в случаях отказа от пластики.

## **2.5. Методы статистической обработки**

Статистические сравнения между степенями повреждения крестообразных связок оценивали при помощи непараметрического U-критерия Манна-Уитни. Всего таким образом было проанализировано более 600 спектров СДО и более 300 спектров Рамановской спектроскопии. Для строгого контроля ошибок первого рода ( $\alpha$ ), возникающих в результате выполнения множественных парных сравнений в многогрупповой структуре данных, была внедрена строгая процедура контроля частоты ошибок по семействам. В частности, для корректировки исходных р-значений, полученных с помощью каждого отдельного U-критерия Манна-Уитни,

применяли поправку Бонферрони. Для заключения о статистической значимости скорректированное р-значение должно было быть меньше установленного уровня, равного 0,05. Этот строгий статистический подход гарантирует, что вероятность ошибочного отклонения нулевой гипотезы во всем наборе сравнений поддерживается на уровне или ниже номинального 0,05, тем самым повышая надежность и обоснованность выводов относительно истинных биологических или клинических различий между экспериментальными группами.

## ГЛАВА 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ЭТАПА ИССЛЕДОВАНИЯ

### 3.1. Выбор метода спектроскопии для диагностики состояния крестообразных связок

На каждом из 30 эксплантов, взятых в ходе тотального эндопротезирования коленного сустава, были последовательно применены три описанных во 2-й главе диагностических методики: спектроскопия диффузного отражения, Рамановская спектроскопия и флуоресцентная спектроскопия.

#### Спектроскопия диффузного отражения

При исследовании спектров эффективного поглощения не обнаружено статистически значимых различий между показателями, полученными для передних и задних крестообразных связок ( $p > 0,05$ ), в связи с чем анализ полученных данных проводили только по степени тяжести повреждений в соответствии с классификацией AAOS, без деления исследуемых связок на ПКС и ЗКС.

В ближнем инфракрасном диапазоне (800-1050 нм) мы получили пик, ассоциированный с поглощением воды, при длине волны 980 нм, а с поглощением коллагена – 910 нм. В среднем инфракрасном диапазоне (1050-1800 нм) пики поглощения воды и коллагена получены на 1200 нм, 1400 нм и 1550 нм.

Таблица 3.1 – Средние значения спектров эффективного поглощения эксплантов ( $OD(\lambda)$ ) на различных длинах волн

		Тяжесть поражения по AAOS		
	Длина волны (нм)	I степень	II степень	III степень
Ближний инфра-	910	-0.029611287753006373	0.0076817117016659605	0.047724130817993836

Продолжение Таблицы 3.1

красный диапазон	980	0.24865539463364925	0.2628257971401316	0.2978060975180321
Средний инфракрасный диапазон	1200	0.5067085783012302	0.5678271188087163	0.5951267697725632
	1400	2.8493098573147226	2.8485765284222726	2.810999330532399
	1550	2.732115993535909	2.6891843403627083	2.6175221368850914

Были рассчитаны значения амплитуд на характерных пиках, построены диаграммы размаха и с помощью непараметрического критерия Манна-Уитни (U) и применением поправки Бонферрони произведена оценка статистической значимости различий между данными, полученными при исследовании связок с различными степенями повреждений по классификации AAOS.

В ближнем инфракрасном диапазоне при длине волны 910 нм (коллаген) обнаружены статистически значимые различия ( $p < 0,05$ ) между полученными показателями по всем трем степеням тяжести поражений связки в соответствии с классификацией AAOS. Это указывает на существенное изменение структурных свойств коллагена по мере прогрессирования дегенерации. В то же время, при длине волны 980 нм между I и II степенью статистически значимых различий не выявлено ( $p > 0,05$ ), что делает измерения с длиной волны 910 нм более информативными для определения степени поражения крестообразных связок (Рисунок 3.1).

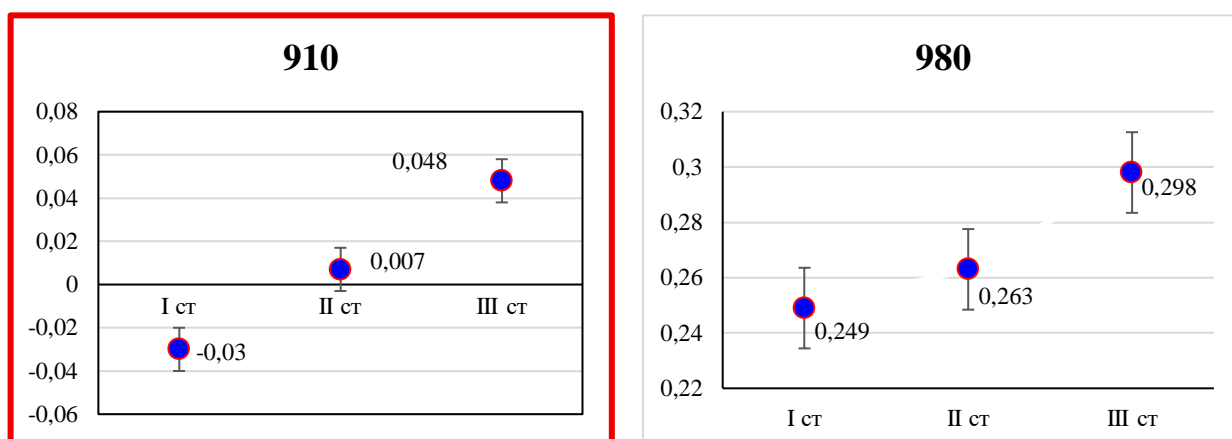
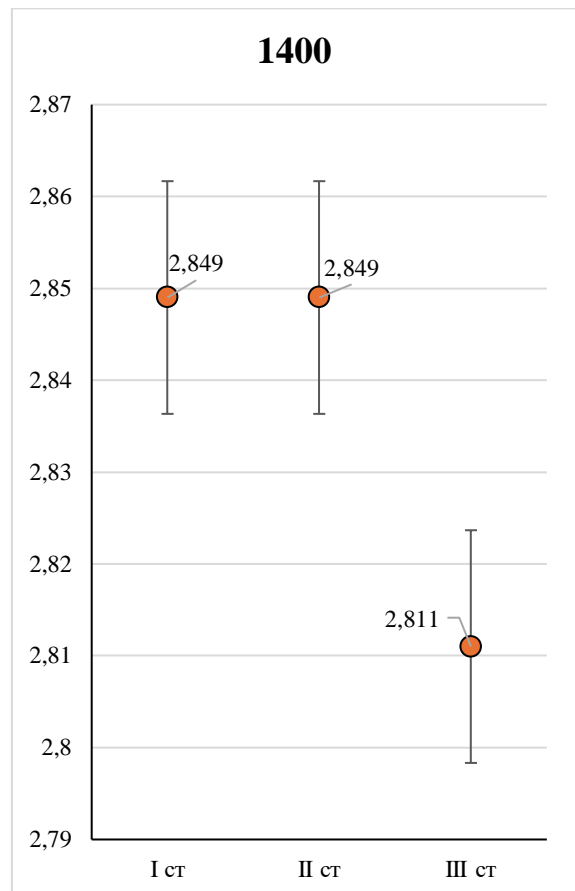
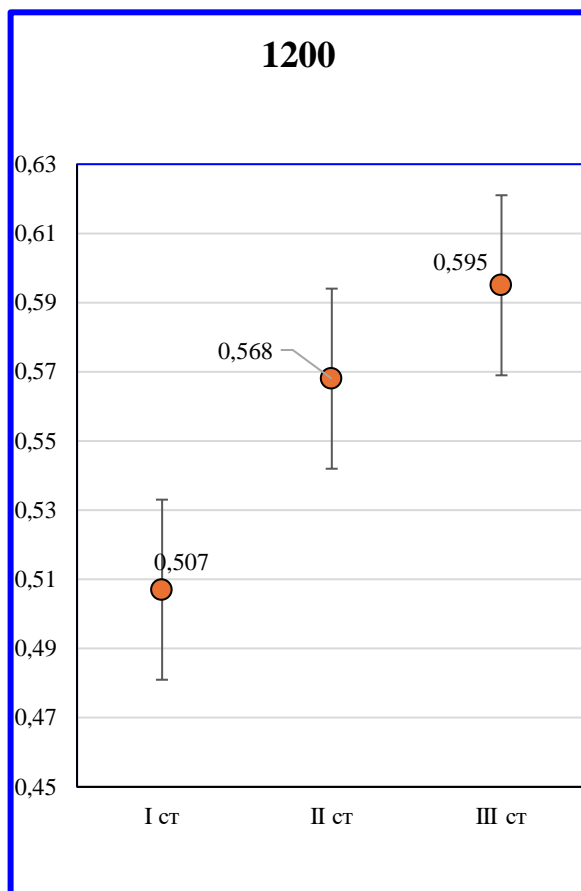


Рисунок 3.1 – Средние степени значений спектров эффективного поглощения эксплантов в ближнем инфракрасном диапазоне

В среднем инфракрасном диапазоне проведен анализ разницы амплитуд между пиками и фоновым спектром 1050 нм, что является стандартным подходом для минимизации влияния фонового рассеяния. В диапазоне 1200 – 1050 нм зафиксирована статистически высокозначимая разница между средними показателями I и II степени поражений связки по ААОС ( $p < 0,0001$ ), что для целей диагностики представляется наиболее важным, так как дифференцировать эти степени по результатам клинического, лучевого и даже артроскопического исследования достаточно затруднительно. Отличия между I и III степенями по ААОС позволяют определить исследования при всех примененных длинах волн (1200, 1400 и 1550 нм) ( $p < 0,01$ ), однако такая дифференцировка существенно более доступна и с помощью других методик, а также при СДО, проводимом в ближнем инфракрасном диапазоне (910 нм) (Рисунок 3.2).



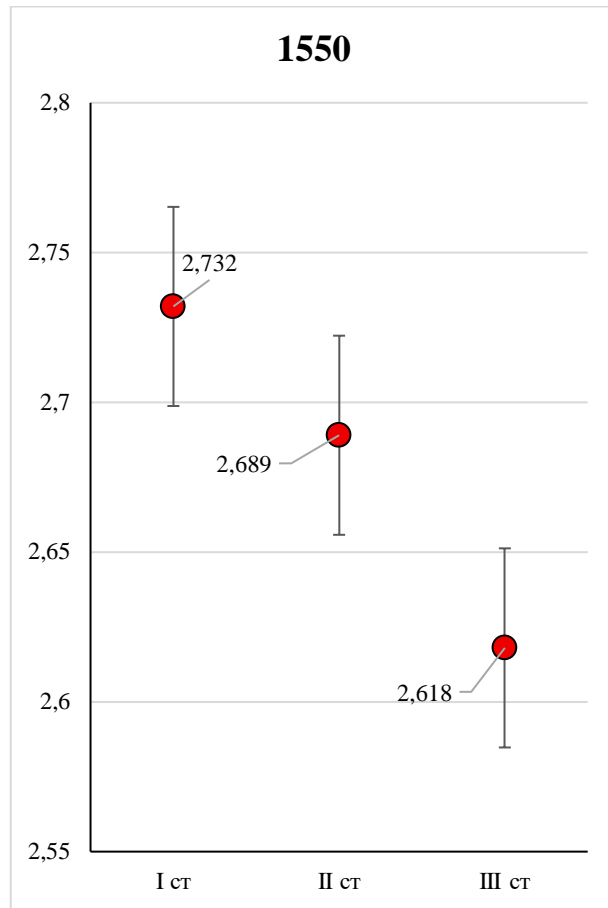


Рисунок 3.2 – Средние степени значений спектров эффективного поглощения эксплантов в среднем инфракрасном диапазоне

Таким образом, измерение спектров СДО в ближнем и среднем инфракрасных диапазонах позволяет дифференцировать экспланты по степени поражения связок в соответствии с классификацией AAOS благодаря чувствительности этого исследования к структурным изменениям коллагена. Наиболее информативными при этом являются исследования в ближнем инфракрасном диапазоне с длиной волны 910 нм и в среднем инфракрасном диапазоне с длиной волны 1200 нм.

### Рамановская спектроскопия

По результатам измерений был построен график средних спектров Рамановского рассеяния в зависимости от Рамановского сдвига (Рисунок 3.3), а также график основных полос рассеяния (Рисунок 3.4).

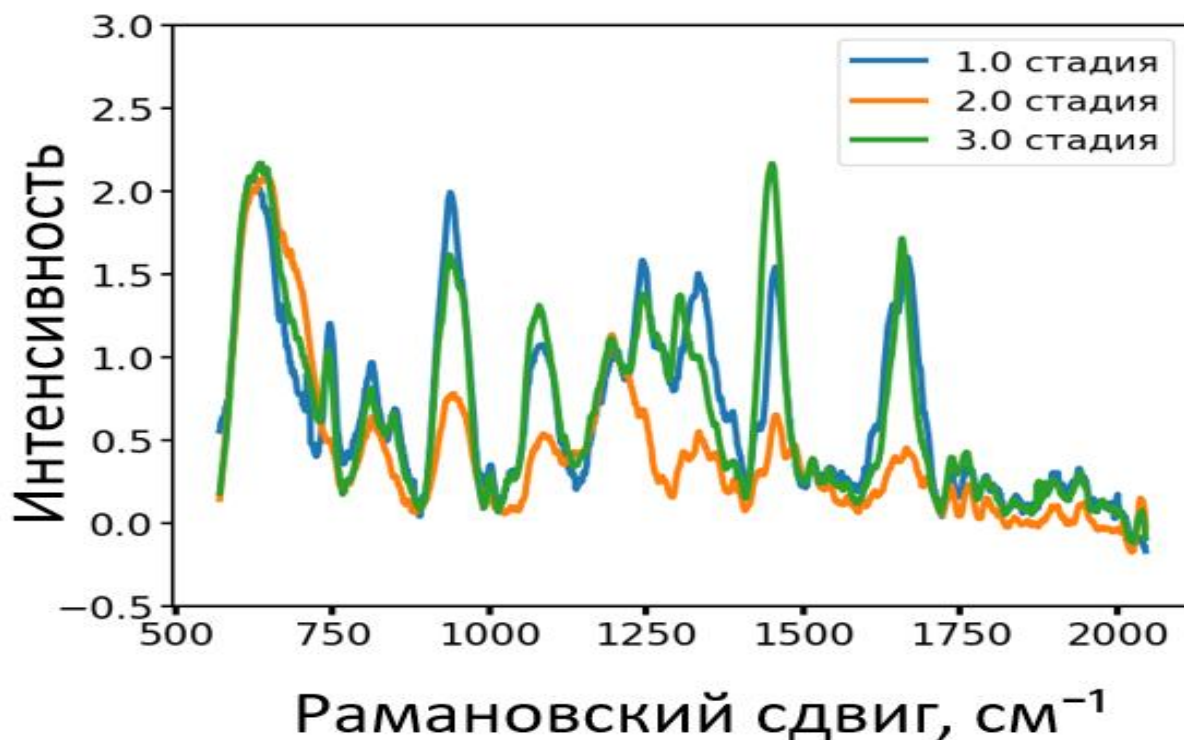


Рисунок 3.3 – Вариабельность интенсивности спектров Рамановского рассеяния в зависимости от стадии поражения связки по ААОС

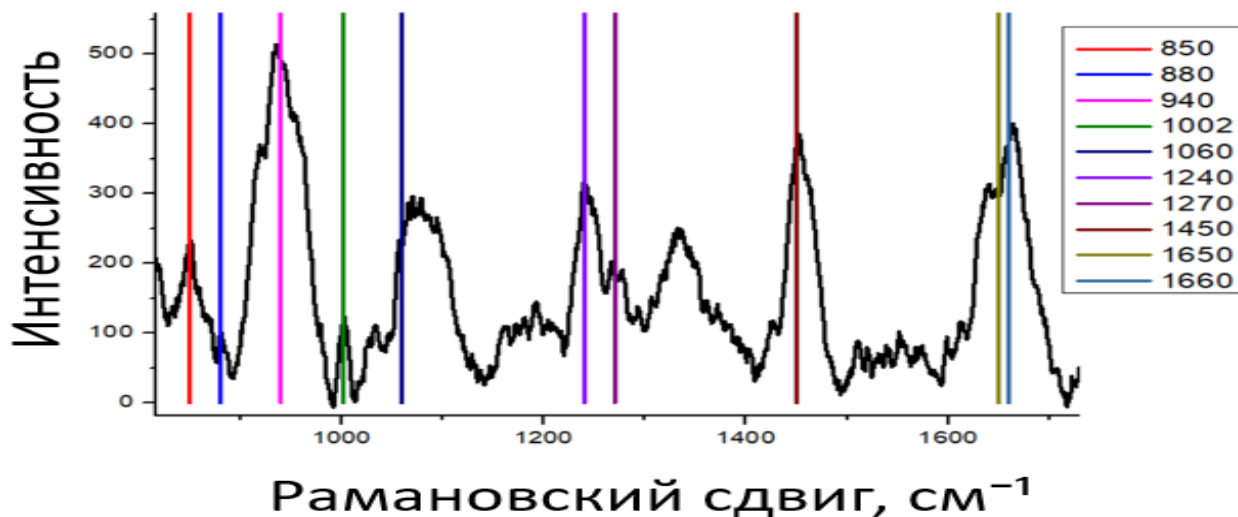


Рисунок 3.4 – Основные полосы Рамановского рассеяния:  
 $850, 880 \text{ см}^{-1}$  – коллаген;  $940, 1002 \text{ см}^{-1}$  – белки;  
 $1060 \text{ см}^{-1}$  – сульфатированные глюкозаминогликаны, протеогликианы;  
 $1240 \text{ см}^{-1}$  – дефектный коллаген;  $1270 \text{ см}^{-1}$  – функциональный коллаген;  
 $1450 \text{ см}^{-1}$  – липиды, белки;  $1650, 1660 \text{ см}^{-1}$  – коллаген



В Рамановской спектроскопии для нивелирования аппаратных факторов и различного времени накопления принято использовать отношения интенсивностей пиков. Нормирование проводили на самые интенсивные полосы:  $1270\text{ см}^{-1}$  (маркер функционального коллагена) и  $1450\text{ см}^{-1}$  (маркер белков/липидов), на которые были построены диаграммы (Таблица 3.2).

Таблица 3.2 – Средние значения интенсивности спектров Рамановского рассеяния

	Рамановский сдвиг ( $\text{см}^{-1}$ )	Тяжесть поражения по ААОС		
		I степень	II степень	III степень
Нормирование на пик $1270\text{ см}^{-1}$	850	1.0571041972564734	1.1194947408017436	1.2410718329104435
	880	0.4434517541016771	0.5225478820226153	0.5950489302199177
	1002	0.3483102942918242	0.36037937994636463	0.4160418956218717
	1240	2.2403837785080083	2.4250584688811211	2.4654424005146405
	1450	1.5532878782376935	1.5743817891006309	1.581451120230315
Нормирование на пик $1450\text{ см}^{-1}$	1240	1.5212621001505018	3.2024928416709146	3.422728792376406
	1270	0.9233184975640137	1.1456744184396896	1.2326858123268278
	1650	0.8519529793229525	0.8846229311601777	0.8954603696266325
	1660	1.0859340816987881	1.0992212078118377	1.1133985664233674

Используя непараметрический критерий Манна-Уитни (U) с применением поправки Бонферрони, оценили статистические различия между распределениями выделенных полос.

При нормировании на пик  $1270\text{ см}^{-1}$  (коллаген) обращает на себя внимание отношение дефектного коллагена к функциональному (диаграмма  $1240/1270\text{ см}^{-1}$ ), где выявлено статистически значимое различие между I и II степенью поражения связки по ААОС ( $p < 0,001$ ). Это подтверждает, что степень дегенерации коррелирует с увеличением доли дефектного коллагена. Статистически значимое различие между II и III степенью ( $p < 0,01$ ) определено только при исследовании отношений  $850/1270$  и  $1002/1270\text{ см}^{-1}$  (Рисунок 3.5).

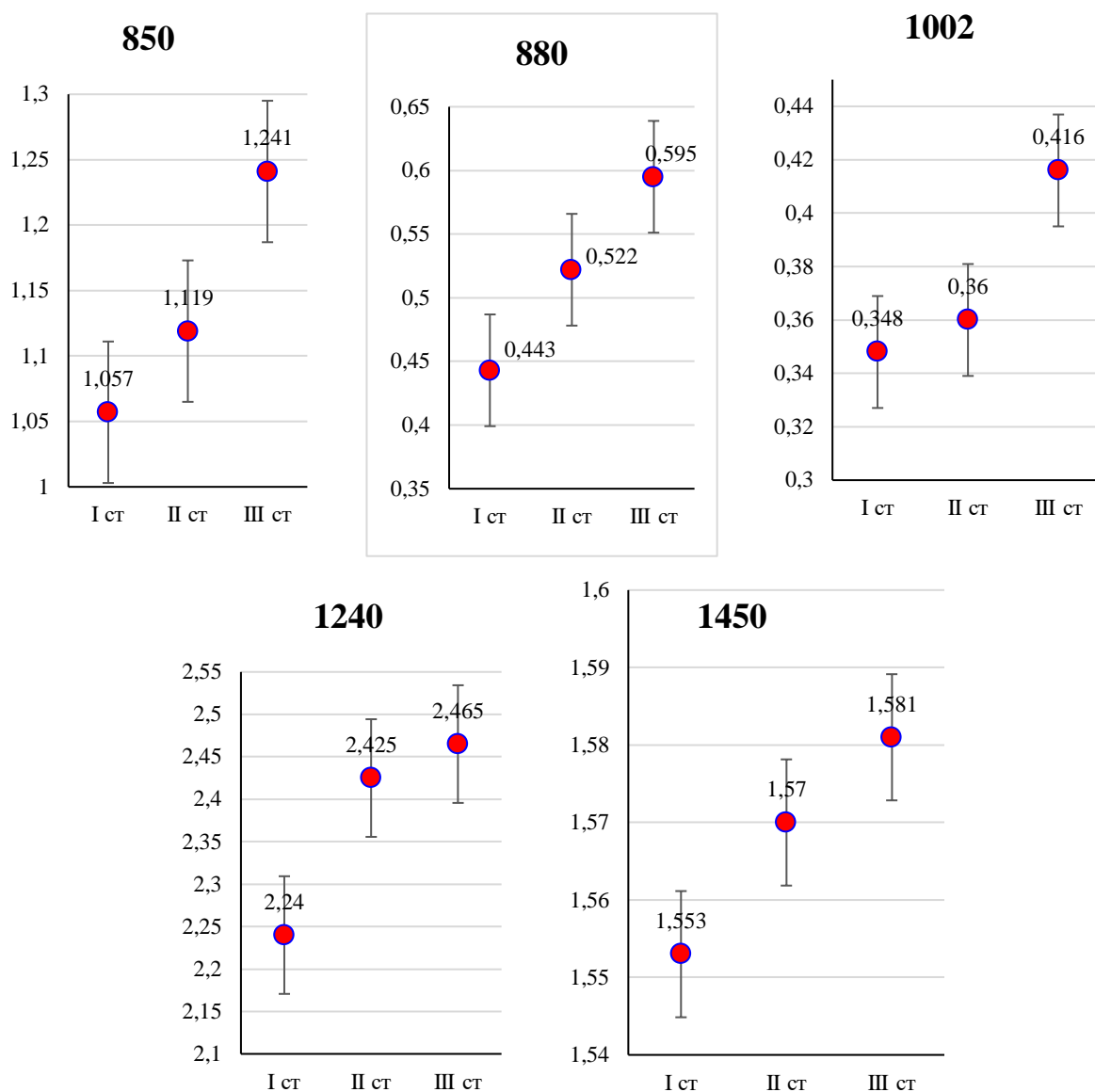


Рисунок 3.5 – Диаграммы размаха с оценкой статистической значимости различий между степенями тяжести поражения связок по AAOS по данным РС (нормирование на пик 1270 см<sup>-1</sup>)

При нормировании на пик 1450 см<sup>-1</sup> (белок/липиды) можно отметить статистически значимые различия между I и II степенью поражения связки по AAOS на полосах Рамановского рассеяния 1240, 1270, 1650 см<sup>-1</sup> ( $p < 0,001$ ). Статистически значимы также различия между I и III степенью на всех полосах Рамановского рассеяния ( $p < 0,001$ ). Однако различия между II и III степенью по AAOS при данном методе анализа были статистически незначимыми ( $p > 0,05$ ) (Рисунок 3.6).

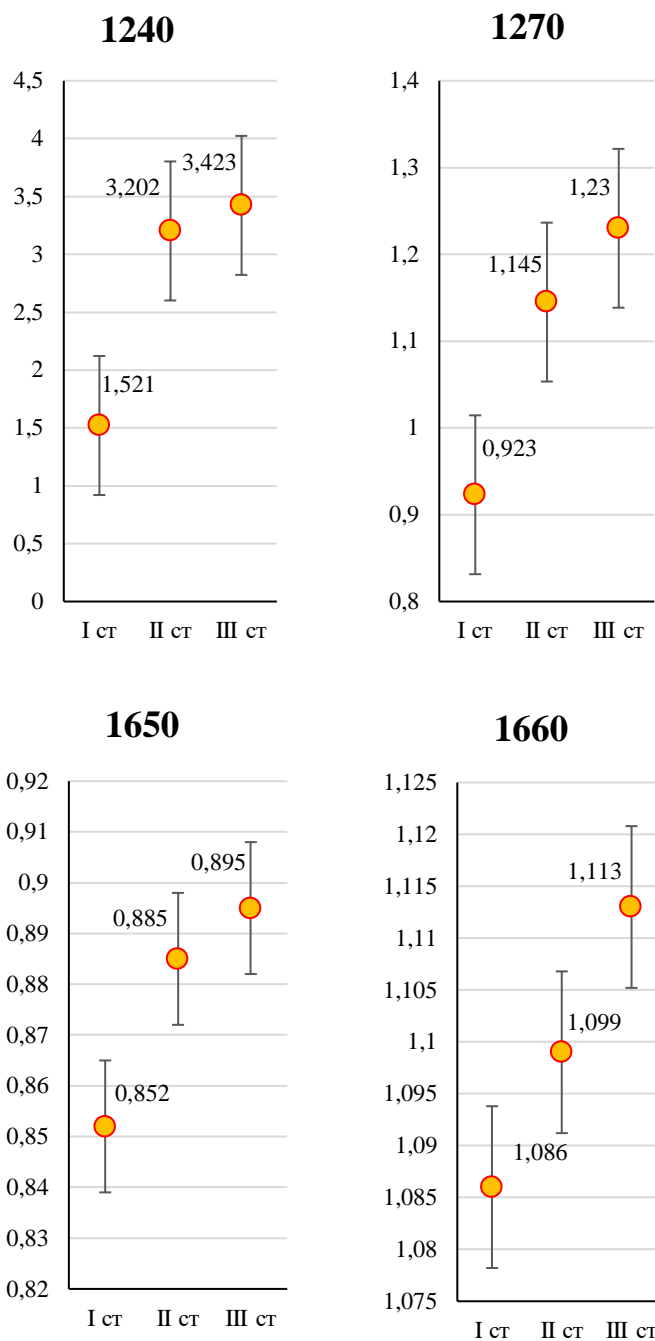


Рисунок 3.6 – Диаграммы размаха с оценкой статистической значимости различий между степенями тяжести поражения связок по AAOS по данным PC (нормирование на пик  $1450 \text{ cm}^{-1}$ )

Таким образом, метод Рамановской спектроскопии позволяет эффективно дифференцировать состоятельную связку (неповрежденную или поврежденную незначительно – I степень по AAOS) от патологически измененной (II и III степени) за счет оценки отношения дефектного и функционального коллагена. Тем не менее, дифференциация между II и III степенями поражения оказалась невозможной

практически при всех режимах исследования, что снижает диагностическую ценность метода.

### Флуоресцентная спектроскопия

В ходе эксперимента были получены спектры флуоресценции для каждого образца, которые продемонстрировали вариабельность оптических свойств в зависимости от длины волны возбуждения. Наибольшая интенсивность флуоресценции отмечена в диапазоне 350-400 нм (Рисунок 3.7).

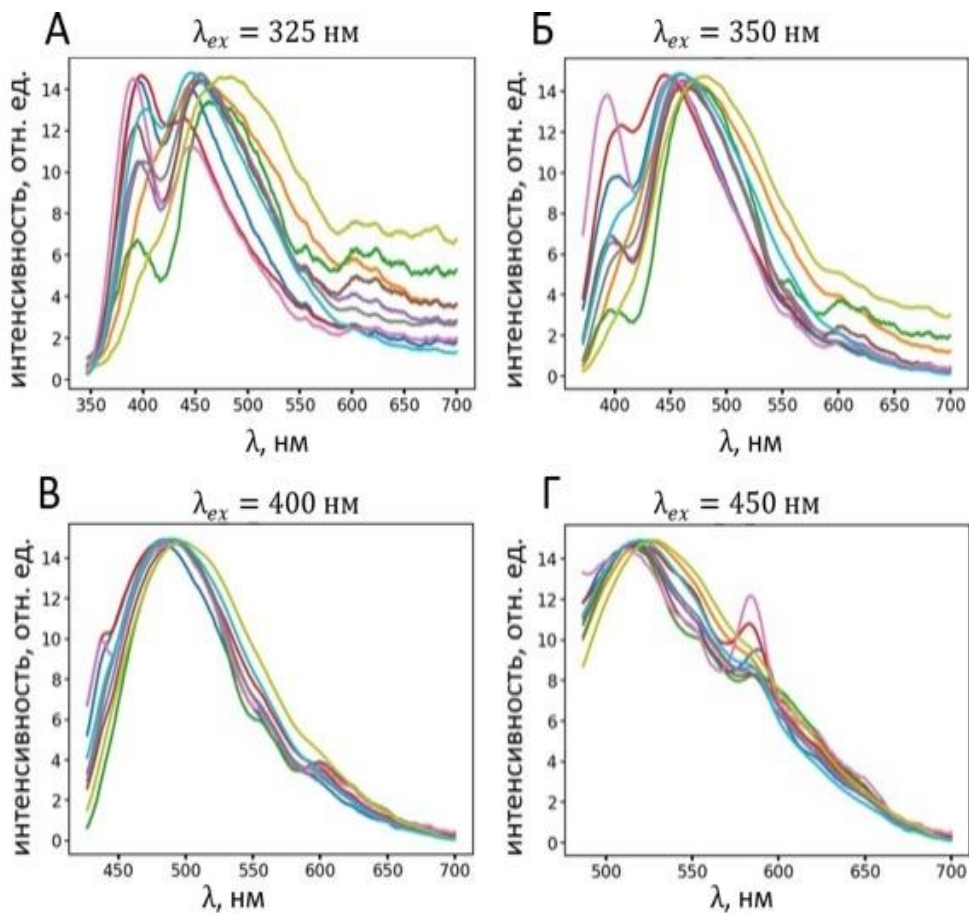


Рисунок 3.7 – Средние спектры флуоресценции исследованных связок на различных длинах волн по данным ФС

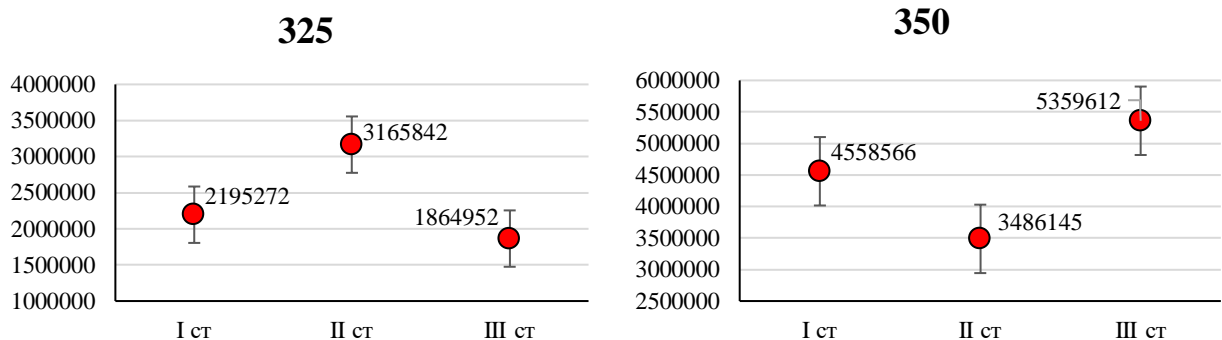
Анализ данных показывает существенные различия в форме спектров для разных образцов. Наблюдаемая вариабельность спектральных характеристик, вероятно, связана с изменениями биохимического состава тканей, в частности,

концентрации флуорофоров, таких как коллаген, эластин, протеогликаны и гликозаминогликаны, свойства и концентрации которых изменяются при развитии патологии. При этом отмечено сходство спектральных характеристик при возбуждении на близких длинах волн: спектры, полученные при 325 и 350 нм, демонстрируют аналогичные особенности, так же, как и спектры при 400 и 450 нм (Таблица 3.3).

Таблица 3.3 – Средние значения показателей ФС

Длина волны возбуждения (нм)	Тяжесть поражения по ААОС		
	I степень	II степень	III степень
325	2195271.539130435	3165841.935206577	1864951.740365584
350	4558565.976811593	3486145.445290541	5359612.063795445
400	7533247.811594204	3236781.595886485	4567328.747639146
450	5308449.4942029	7067338.589412629	5873486.738298472

Полученные результаты ФС позволяют сделать вывод о достаточности исследования флуоресцентных свойств тканей при двух характерных длинах волн возбуждения – 325 и 400 нм, так как эти значения охватывают основные спектральные особенности, обусловленные ключевыми флуоресцентными маркерами биологических тканей. Однако, основываясь на данном методе, нельзя однозначно дифференцировать степень повреждения эксплантов в соответствии с классификацией ААОС – четкой зависимости полученных показателей от тяжести повреждений определить не удалось. К тому же, даже в рамках одной степени повреждений по ААОС показатели слишком сильно различаются (Рисунок 3.8).



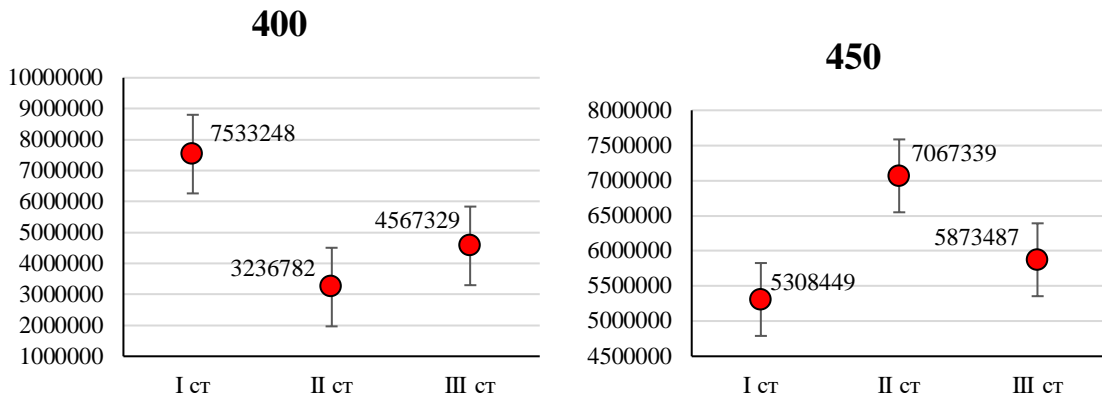


Рисунок 3.8 – Показатели интенсивности флуоресценции при различной степени тяжести повреждения связок по AAOS (данные ФС)

Таким образом, после сбора и анализа 150 спектров было принято решение считать метод ФС неприменимым для оценки патологических изменений крестообразных связок.

### Итоги эксперимента

Поскольку метод флуоресцентной спектроскопии показал свою непригодность для уточнения степени тяжести поражений крестообразных связок коленного сустава, окончательный выбор делали между двумя оставшимися – спектроскопии диффузного отражения и Рамановской спектроскопией. Установлено, что по статистической значимости выявленных отличий метод СДО в отношении диагностики степени тяжести поражения связок по классификации AAOS имеет несомненное преимущество (Таблица 3.4).

Таблица 3.4 – Статистическая значимость различий (p) в зависимости от степени поражения эксплантов связок по AAOS

Вид исследования	Исследуемые спектры	Значение критерия p		
		I ст vs II ст	II ст vs III ст	I ст vs III ст
Спектроскопия диффузного отражения	910 нм	p < 0,05	p < 0,01	p < 0,05
	A1200-A1050 нм	p < 0,0001	p > 0,05	p < 0,01

Продолжение Таблицы 3.4

Рамановская спектроскопия	850/1270 $\text{cm}^{-1}$	$p < 0,001$	$p < 0,001$	$p > 0,05$
	880/1270 $\text{cm}^{-1}$	$p < 0,0001$	$p > 0,05$	$p > 0,05$
	1002/1270 $\text{cm}^{-1}$	$p < 0,001$	$p > 0,05$	$p > 0,05$
	1240/1270 $\text{cm}^{-1}$	$p < 0,0001$	$p > 0,05$	$p < 0,01$
	1450/1270 $\text{cm}^{-1}$	$p < 0,0001$	$p > 0,05$	$p < 0,001$
	1240/1450 $\text{cm}^{-1}$	$p < 0,001$	$p > 0,05$	$p > 0,05$
	1270/1450 $\text{cm}^{-1}$	$p < 0,0001$	$p > 0,05$	$p < 0,001$
	1650/1450 $\text{cm}^{-1}$	$p < 0,0001$	$p > 0,05$	$p < 0,001$
	1660/1450 $\text{cm}^{-1}$	$p < 0,0001$	$p > 0,05$	$p < 0,001$

Преимущество СДО обусловлено её способностью регистрировать статистически значимые различия в ключевых спектральных параметрах, отражающих структурно-функциональные изменения соединительнотканых компонентов исследуемых образцов. Особо следует отметить, что именно СДО позволила статистически значимо отличить как I от II, так и II от III степени поражения крестообразных связок по классификации AAOS, что принципиально важно для принятия оптимального решения по лечебной тактике. Для РС степень дифференциации стадий оказалась возможной в меньшей степени, так как по ряду исследуемых спектров отличия были статистически незначимыми. Полученные данные подтверждают превосходство СДО в контексте решаемых задач исследования.

Таким образом, спектроскопия диффузного отражения света была признана наиболее перспективным и методологически обоснованным диагностическим инструментом для дифференцировки стадий патологии крестообразных связок коленного сустава.

### 3.2. Рабочая классификация и лечебно-диагностический алгоритм

#### Классификация

По результатам эксперимента в качестве спектроскопической методики диагностики повреждений крестообразных связок была избрана СДО, в соответствии с которой исследование проводили в двух инфракрасных диапазонах спектров эффективного поглощения – ближнем ( $OD(\lambda)$  910 нм) и среднем ( $OD(\lambda)$  1200-1050 нм). Классификация состоит из трех степеней, практически повторяя позиции классификации ААОС, однако основана не на визуальной, а на количественной оценке глубинных структурных изменений, определённых с помощью СДО (Таблица 3.5).

Таблица 3.5 – Рабочая классификация повреждений крестообразных связок коленного сустава по данным СДО

Степень повреждения и ее характеристика		Диапазон спектров эффективного поглощения $OD(\lambda)$	
		Ближний инфракрасный диапазон, 910 нм	Средний инфракрасный диапазон 1200 нм
0-1 ст	Связка не повреждена или повреждения незначительны и не отражаются на функции связки	< 0,02	< 0,54
2 ст	Структурные повреждения связки при ее визуальной сохранности и сниженной функции:	0,02 – 0,06	0,54 – 0,60
3 ст	Грубые структурные повреждения связки с ее полной несостоятельностью	> 0,06	> 0,56

Как видно из таблицы, диапазоны спектров эффективного поглощения  $OD(\lambda)$ , определенные для 2 и 3 степени патологии связки по нашей классификации в среднем инфракрасном диапазоне (1200 нм) «накладываются» друг на друга, что отражает полученные в ходе эксперимента данные о недостаточной информативности данного диапазона СДО в отношении дифференцировки этих



степеней поражения крестообразных связок. В связи с этим мы определили СДО-исследование в ближнем инфракрасном диапазоне (910 нм) как основное, а в среднем инфракрасном диапазоне (1200 нм) как вспомогательное.

### **Алгоритм выбора оптимальной тактики**

Диагностику состояния крестообразных связок проводили как в предоперационном периоде, так и интраоперационно.

Основой алгоритма явилась последовательная диагностика, выполняемая по принципу «от простого к сложному». Вначале, в предоперационном периоде, проводили неинвазивную диагностику, определяя состояние крестообразных связок по данным МРТ в соответствии с классификацией ACLOAS. МРТ-исследование, наряду с клиническими признаками, являлось обоснованием показаний к операции артроскопии. Эти показания могли быть определены не только при диагностированном повреждении крестообразных связок, но и при выявленной патологии других внутрисуставных структур. В ходе диагностического этапа артроскопии, когда появлялась возможность прямой визуализации крестообразных связок, а также тактильного тестирования их состояния с помощью артроскопического крючка, предоперационный диагноз мог быть уточнен. Маловероятно, чтобы такое уточнение произошло в сторону полного отрицания наличия патологии, так как это могло говорить только о недостаточном качестве выполненной МРТ или некомпетентной интерпретации ее результатов. По этой же причине также маловероятно, чтобы полный разрыв крестообразных связок не был определен еще при выполнении МРТ. Поэтому в своем алгоритме мы рассматривали только ситуации, когда первоначальный МРТ-диагноз, соответствующий 0-1 типам по классификации ACLOAS, после артроскопической ревизии мог быть изменен на II степень по классификации AAOS.

СДО, позволяющую получить данные о глубинных структурных изменениях связок, мы считали наиболее точной диагностической методикой. Однако в такой диагностике нет необходимости при полном разрыве, надежно верифицированном

на МРТ и подтвержденном данными артроскопии. Поэтому выполнение СДО считали показанным при предварительно установленном диагнозе патологии крестообразных связок I или II степени по AAOS. В случаях повреждений I степени по AAOS возможно выявление более тяжелой патологии (II степень), а при II степени по AAOS – изменение окончательного диагноза как в сторону его отягощения (III степень), так и в сторону снижения тяжести (I степень) (Рисунок 3.9).

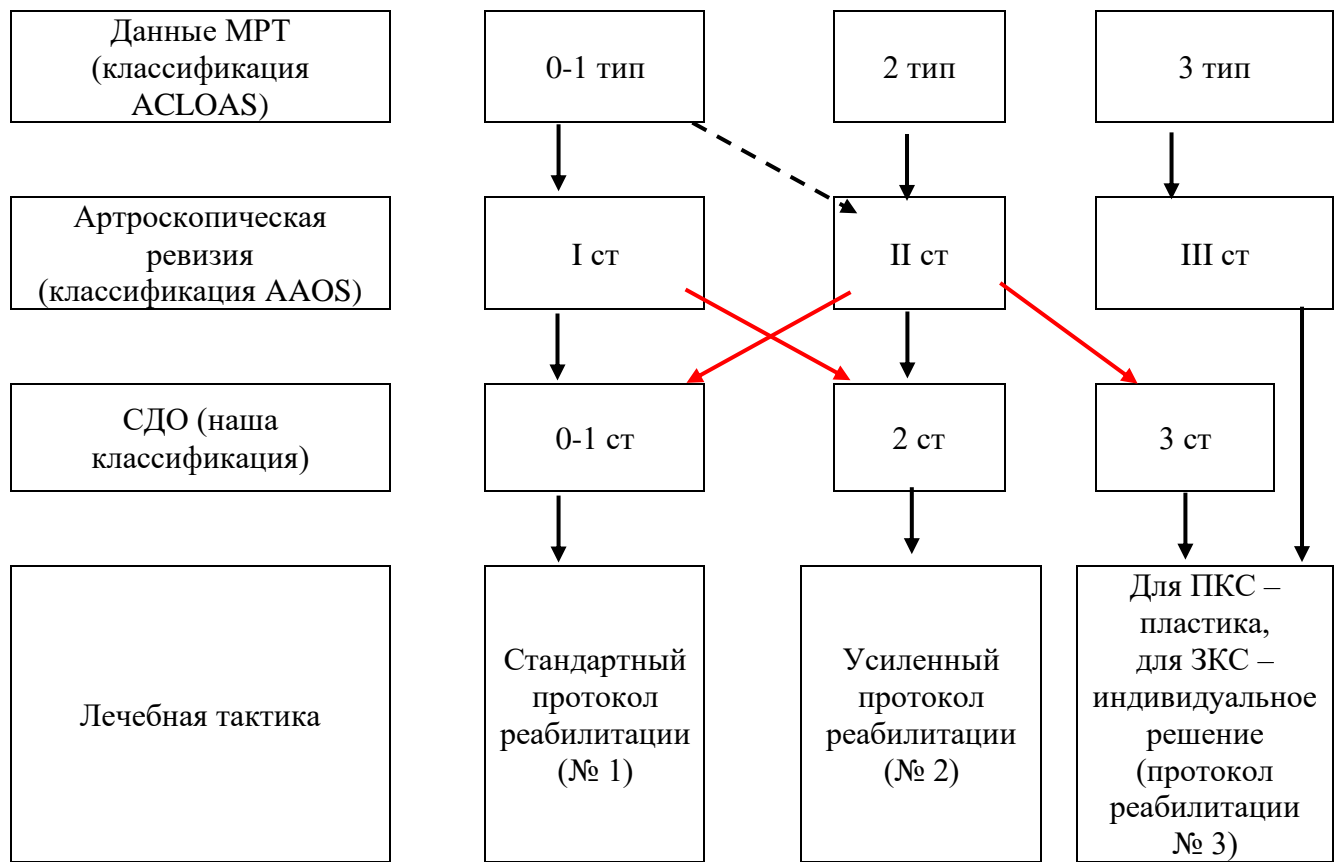


Рисунок 3.9 – Лечебно-диагностический алгоритм определения оптимальной лечебной тактики при повреждении крестообразных связок коленного сустава (красными стрелками показано возможное направление коррекции диагноза в зависимости от результатов СДО)

В соответствии с данными литературы и собственным опытом, пластику ПКС считали показанной только при 3 степени повреждений в соответствии с нашей классификацией, то есть при полной несостоятельности. Полное повреждение ЗКС при сохранении состоятельности других структур,

обеспечивающих стабильность коленного сустава, не считали абсолютным показанием к выполнению пластики. В таких случаях решение принимали индивидуально, отдавая предпочтение консервативному реабилитационному лечению в соответствии с протоколом № 3. При 1 степени повреждения проводили консервативное лечение по стандартному протоколу (№ 1), а при 2 степени применяли усиленный реабилитационный протокол (№ 2), заключающийся прежде всего в более длительной иммобилизации и разгрузке конечности.

## ГЛАВА 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЛЕЧЕНИЯ ПАЦИЕНТОВ

Перед клиническим этапом исследования была поставлена задача подтверждения эффективности разработанной методики диагностики состояния крестообразных связок коленного сустава с помощью интраоперационного проведения СДО.

### 4.1. Методика интраоперационной диагностики

В ходе эксперимента методика комплексной диагностики состояния крестообразных связок была применена в условиях широкого открытого доступа при выполнении тотального эндопротезирования коленного сустава и далее исследования эксплантов с помощью СДО. Для клинического использования методику нужно было применять в интраоперационных условиях выполнения артроскопии коленного сустава.

В положении пациента лежа на спине из стандартных переднемедиального и переднелатерального артроскопических доступов проводили ревизию коленного сустава с оценкой состояния крестообразных связок по шкале AAOS. Затем выполняли обследование передней и задней крестообразных связок при помощи СДО в ближнем и среднем инфракрасных диапазонах. Для измерений использовали приёмно-передающий оптический зонд, описанный в предыдущей главе.

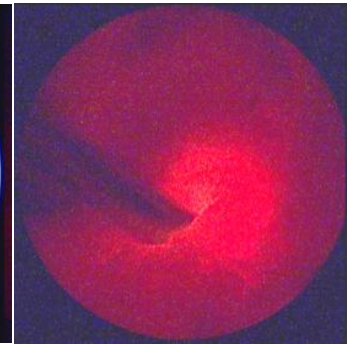
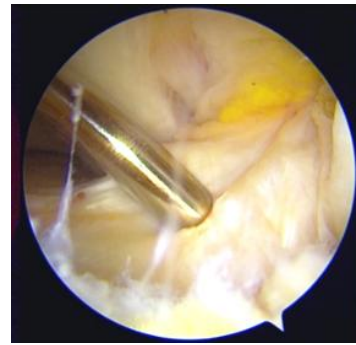
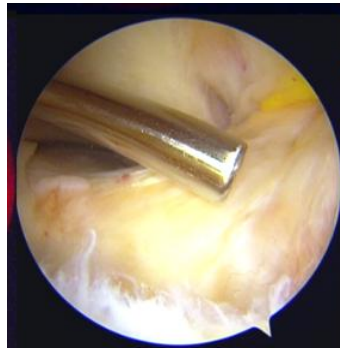
Измерения проводили по протоколу, разработанному и применённому на экспериментальном этапе, с тем лишь отличием, что все манипуляции выполняли внутрисуставно через артроскопические доступы в жидкостной среде. В соответствии с итогами проведенного эксперимента, оценивали спектры эффективного поглощения на длине волны 910 нм в ближнем инфракрасном диапазоне и 1200 нм в среднем инфракрасном диапазоне.

В качестве источника света использовали вольфрам-галогеновую лампу со сплошным спектром излучения (Thorlabs, Германия). Регистрацию отклика

осуществляли в расширенном диапазоне 800-1800 нм с использованием двух спектрометров: QE2000pro (OceanOptics, США) для диапазона 800-1050 нм (ближний ИК-диапазон) и AvaSpec-NIR256-2.5-HSC (Avantes BV, Нидерланды) для диапазона 1050-1800 нм (средний ИК-диапазон) (Рисунки 4.1 и 4.2).



А



Б

Рисунок 4.1 – Выполнение СДО-диагностики:  
А – вид операционной; Б – интраоперационные изображения

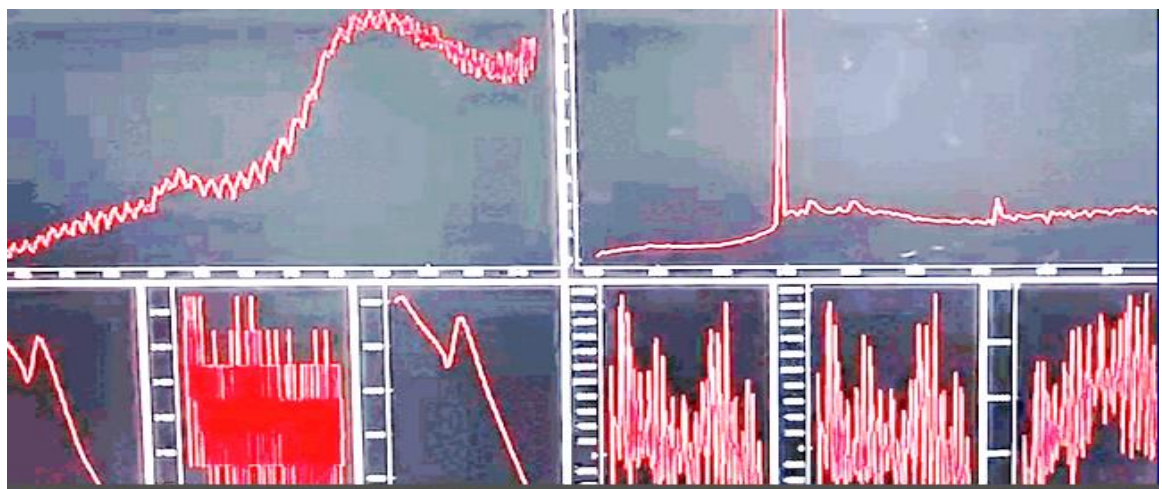


Рисунок 4.2 – Выполнение СДО-диагностики: графики спектров эффективного поглощения, получаемые в режиме реального времени

Перед каждой серией экспериментов измеряли эталонный спектр лампы, полученный при измерении от стандарта диффузного отражения, а также фоновый спектр. После этого рассчитывали спектр отражения ( $R(\lambda)$ ) по формуле:

$$R(\lambda) = \frac{I - I_{bg}}{I_{ref} - I_{bg}}, \quad (4.1)$$

где  $I$  – спектр сигнала,  $I_{bg}$  – фоновый спектр,  $I_{ref}$  – эталонный спектр лампы.

По результатам измерения спектров отражения ( $R(\lambda)$ ) рассчитывали спектр эффективного поглощения ( $OD(\lambda)$ ) по формуле:

$$OD(\lambda) = -\log_{10} R(\lambda). \quad (4.2)$$

Измерения проводили в 9 точках для каждой крестообразной связки: 3 точки в области бедренного энтеза, 3 точки в середине связки и 3 точки в области большеберцового энтеза. Полученные результаты обрабатывали при помощи модели машинного обучения, основанной на методе C-Support Vector Classification.

На проведение СДО-исследования потребовалось в среднем 10,1 мин. За это время определяли показатели как для ПКС, так и для ЗКС. Первые клинические случаи требовали немного больше времени (до 15 мин), а в дальнейшем, когда техника интраоперационных измерений была уверенно освоена, это время не превышало 8 мин. Таким образом, проведение СДО не привело к существенному увеличению продолжительности операции.

После получения показателей спектроскопического исследования считали диагностический этап артроскопии завершенным и приступали к хирургическому этапу, выполняя те действия, ради которых операция была предпринята. За это время интерпретировали данные, полученные при выполнении СДО, верифицируя состояние крестообразных связок в соответствии с разработанной нами классификацией. Определяющим диагностическим критерием считали данные, полученные при исследовании в ближнем инфракрасном диапазоне (910 нм). Если при этом данные, полученные в среднем инфракрасном диапазоне (1200 нм), также соответствовали этой степени, точность диагноза считали высокой. В случаях

выявления полного разрыва связки (3 степень по нашей классификации), операцию дополняли выполнением аутопластики.

#### **4.2. Характеристика пациентов**

На клиническом этапе разработанная методика была применена у 15 пациентов – 7 женщин и 8 мужчин, средний возраст которых составил 35,5 лет.

Критериями включения в исследование были показания к выполнению артроскопического вмешательства, установленные в ходе клинического обследования и лучевой диагностики (рентгенография и МРТ коленного сустава), а также срок с момента получения травмы не более 6 недель. У всех пациентов состояние крестообразных связок по МРТ-классификации ACLOAS оценивали как 0-2 типы. Пациентов с 3 типом повреждения крестообразных связок (полный разрыв), определенным клинически и подтвержденным данными МРТ, в исследование не включали. Не включали в исследование также пациентов с деформацией костных структур коленного сустава, вызванной последствиями травмы или дисплазии.

Все пациенты дали информированное письменное согласие на участие в исследовании и были предупреждены о возможном изменении плана операции в зависимости от результатов, полученных при выполнении интраоперационной дополнительной диагностики с помощью методики СДО.

Пациентам выполняли артроскопическую ревизию коленного сустава, в ходе которой оценивали состояние крестообразных связок по классификации AAOS, после чего измеряли их оптические свойства с помощью методики СДО, устанавливая характер поражения связок уже по нашей классификации. В соответствии с разработанным алгоритмом на этой основе корректировали по необходимости лечебную тактику.

### 4.3. Результаты проведенного обследования

Всего у 15 человек было в ходе артроскопии обследовано с помощью СДО по нашей методике 30 крестообразных связок – 15 ПКС и 15 ЗКС.

При исследовании ПКС данные МРТ показали, что у 9 из 15 пациентов (60,0%) определено частичное повреждение (2 тип по ACLOAS). После артроскопической ревизии степень поражения ПКС была определена как более тяжелая в 4 случаях (26,7%): у 3 пациентов вместо I типа по ACLOAS констатирована II степень по AAOS, а у одного пациента вместо 2 типа – III степень. Проведенное далее исследование с применением СДО позволило внести дополнительную коррекцию в определение степени поражения ПКС еще у 3 пациентов: в одном случае в сторону снижения тяжести (вместо II степени определена 1 степень по нашей классификации), и в 2 случаях – в сторону отягощения диагноза (вместо II степени определена 3 степень по нашей классификации). Таким образом, первоначальный предоперационный диагноз, установленный на основании данных МРТ, был уточнен и скорректирован с помощью СДО в 7 случаях из 15 (46,7%) (Рисунок 4.3).

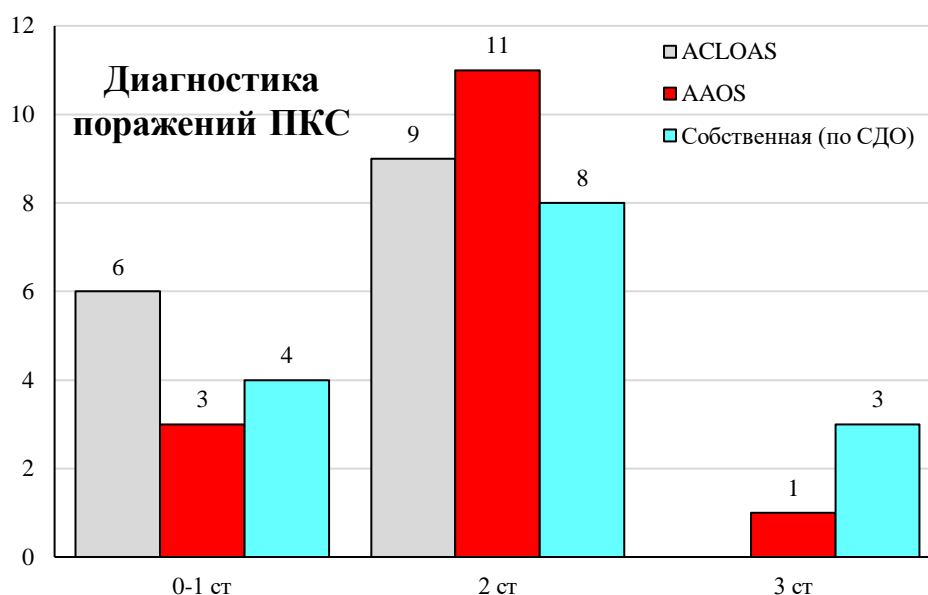


Рисунок 4.3 – Повреждения ПКС у пациентов группы клинического исследования (кол-во случаев)



При исследовании ЗКС коррективы, внесенные в ходе инвазивного обследования в предоперационный диагноз, были не столь существенными. По данным МРТ у всех 15 пациентов выраженных изменений не выявлено. Однако при артроскопической ревизии в двух случаях (13,3%) определена II степень поражения по AAOS. Проведенное далее исследование с применением СДО позволило внести дополнительную коррекцию в определение степени поражения ЗКС: у одного пациента вместо II степени по AAOS определена 3 степень по нашей классификации. Таким образом, первоначальный предоперационный диагноз, установленный на основании данных МРТ, был уточнен с помощью СДО в 2 случаях из 15 (13,3%) (Рисунок 4.4).

#### Диагностика поражений ЗКС

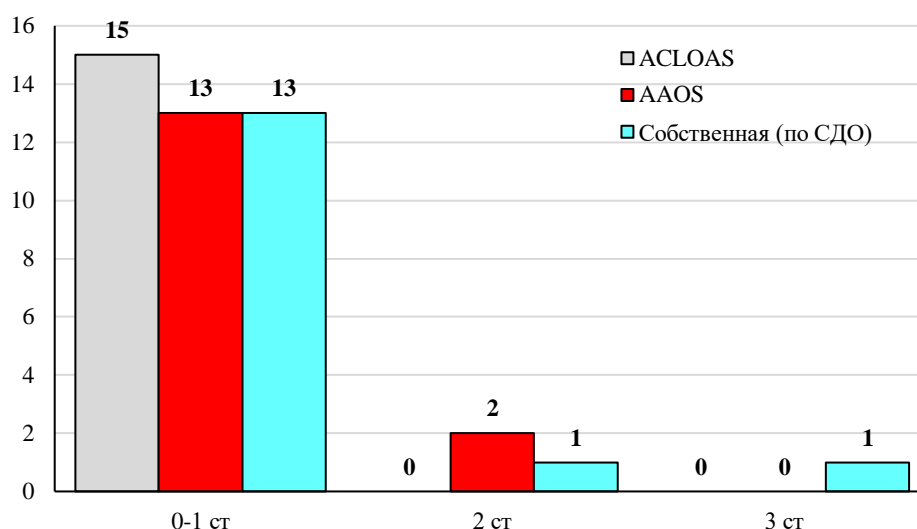


Рисунок 4.4 – Повреждения ЗКС у пациентов группы клинического исследования (кол-во случаев)

В итоге, всего у 15 пациентов исследованы 30 крестообразных связок (15 ПКС и 15 ЗКС). В соответствии с предоперационным диагнозом в 21 случае (70,0%) связки были признаны состоятельными (норма или незначительное повреждение), и 9 связок (30,0%) имели частичное повреждение. Согласно критериям включения, пациенты, у которых еще на этапе выполнения МРТ определяли полный разрыв крестообразных связок, не вошли в исследование. В

процессе дополнительного инвазивного обследования (артроскопическая ревизия и СДО) предварительный диагноз был скорректирован в общей сложности в 9 случаях (30,0%) – 7 в отношении ПКС, и 2 – в отношении ЗКС (Рисунок 4.5, Таблица 4.1).

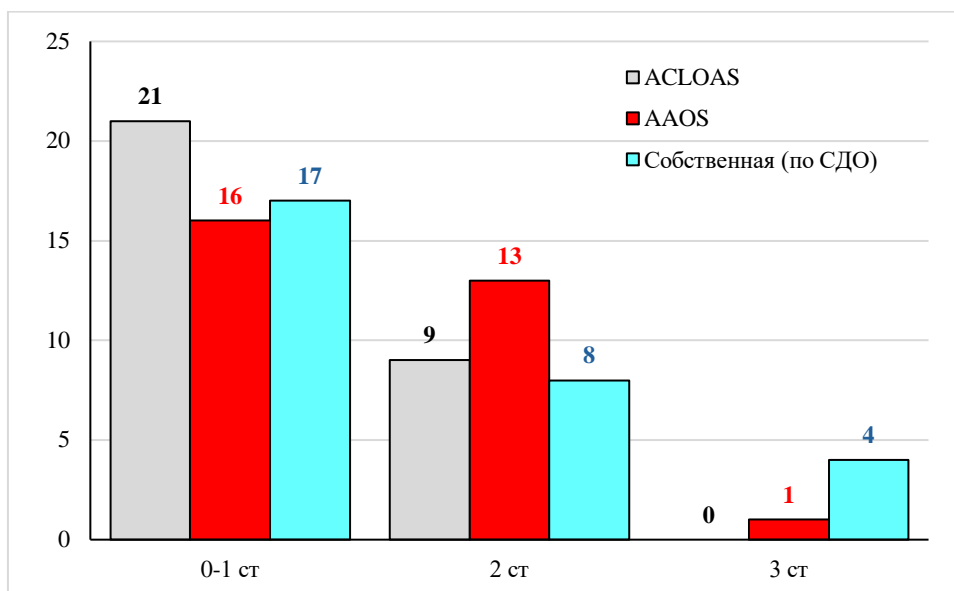


Рисунок 4.5 – Повреждения крестообразных связок коленного сустава у пациентов группы клинического исследования (кол-во случаев)

Таблица 4.1 – Результаты обследования пациентов

Пациент	Степень тяжести						Тактика
	ПКС			ЗКС			
	ACLOAS	AAOS	СДО	ACLOAS	AAOS	СДО	
1	0-1	I	0-1	0-1	I	0-1	Протокол 1
2	0-1	I	0-1	0-1	II	2	Протокол 2
3	0-1	I	0-1	0-1	II	3	Протокол 3
4	0-1	II	0-1	0-1	I	0-1	Протокол 1
5	0-1	II	2	0-1	I	0-1	Протокол 2
6	0-1	II	2	0-1	I	0-1	Протокол 2
7	2	II	2	0-1	I	0-1	Протокол 2
8	2	II	2	0-1	I	0-1	Протокол 2
9	2	II	2	0-1	I	0-1	Протокол 2
10	2	II	2	0-1	I	0-1	Протокол 2
11	2	II	2	0-1	I	0-1	Протокол 2

Продолжение Таблицы 4.1

Пациент	Степень тяжести						Тактика
	ПКС			ЗКС			
	ACLOAS	AAOS	СДО	ACLOAS	AAOS	СДО	
12	2	II	2	0-1	I	0-1	Протокол 2
13	2	II	3	0-1	I	0-1	Пластика + протокол 3
14	2	II	3	0-1	I	0-1	Пластика + протокол 3
15	2	III	3	0-1	I	0-1	Пластика + протокол 3

Исходы проведенного лечения оценивали через 1 год по шкалам-опросникам ВАШ (оценка болевого синдрома), KOOS (Knee Injury and Osteoarthritis Outcome Score – Приложение А), IKDS (International Knee Documentation Committee – Приложение Б), Lysholm (Приложение В). Все 15 пациентов проспективной группы проходили тестирование до и через 1 год после операции.

Перед операцией средний показатель болевого синдрома по ВАШ составил 6,8 балла (сильная боль). У 13 пациентов (86,6%) по шкалам-опросникам функция коленного сустава оценена как «неудовлетворительная»; средние значения составили 61,6 балла (KOOS), 47,4 балла (IKDS) и 52,6 балла (Lysholm).

Все выполненные операции прошли без осложнений, пациенты восстановили активность, отмечено значительное улучшение функции, купирована боль. Через 1 год после операции у всех пациентов функция сустава по KOOS оценена на «хорошо» и «отлично» (100%), причем в диапазоне «отлично» находились 12 человек (80,0%) (средний балл по этой шкале составил 85,1). По IKDS доля «хороших» и «отличных» результатов составила 86,6% (средний балл 82,5), а по Lysholm – 80,0% (средний балл 85,0) (Таблица 4.2).

Таблица 4.2 – Результаты лечения пациентов через 1 год

Пациент	Результаты диагностики			Результаты анкетирования		
	СДО (ПКС)	СДО (ЗКС)	Тактика	КОOS (сред.)	IKDC 2000	Tegner-Lysholm
1	0-1	0-1	Протокол 1	83 (отл.)	83 (хор.)	85 (хор.)
2	0-1	2	Протокол 2	75 (хор.)	76 (удовл.)	77 (удовл.)
3	0-1	3	Протокол 3	76 (хор.)	80 (хор.)	71 (удовл.)
4	0-1	0-1	Протокол 1	72 (хор.)	74 (удовл.)	75 (удовл.)
5	2	0-1	Протокол 2	80 (отл.)	82 (хор.)	80 (хор.)
6	2	0-1	Протокол 2	89 (отл.)	82 (хор.)	94 (отл.)
7	2	0-1	Протокол 2	86 (отл.)	80 (хор.)	85 (хор.)
8	2	0-1	Протокол 2	84 (отл.)	82 (хор.)	80 (хор.)
9	2	0-1	Протокол 2	85 (отл.)	82 (хор.)	86 (хор.)
10	2	0-1	Протокол 2	94 (отл.)	93 (отл.)	94 (отл.)
11	2	0-1	Протокол 2	90 (отл.)	86 (хор.)	89 (хор.)
12	2	0-1	Протокол 2	88 (отл.)	81 (хор.)	84 (хор.)
13	3	0-1	Пластика + протокол 3	90 (отл.)	83 (хор.)	92 (отл.)
14	3	0-1	Пластика + протокол 3	94 (отл.)	92 (отл.)	94 (отл.)
15	3	0-1	Пластика + протокол 3	90 (отл.)	81 (хор.)	89 (хор.)

Более подробный анализ результатов проведенного лечения не входил в задачи данного исследования, которое было посвящено разработке и определению эффективности методики диагностики состояния крестообразных связок коленного сустава. В то же время, применение разработанного алгоритма лечебной тактики, основанного на данных СДО, позволило, пусть и на небольшой когорте пациентов, получить хорошие и отличные результаты, которые, как минимум, не хуже данных, опубликованных в доступных литературных источниках.

#### 4.4. Клинические примеры

##### Клинический пример № 1

Пациентка Ю. 32 лет. Жалобы на боли в правом коленном суставе при физической нагрузке. Из анамнеза: подвернула правую голень 3 недели назад во время танца. После травмы за медицинской помощью не обращалась, самостоятельно принимала нестероидные противовоспалительные препараты с кратковременным положительным эффектом.

При осмотре – область правого коленного сустава обычной конфигурации. Амплитуда активных и пассивных движений в правом коленном суставе незначительно снижена из-за боли. Выпота в суставе нет. Локальной гиперемии, гипертермии, флюктуации в области коленного сустава не выявлено. Симптом Лахмана отрицательный, симптом переднего выдвигающего ящика слабо положительный (+).

По данным МРТ – разрыв медиального мениска, признаки повреждения ПКС 1 типа по шкале ACLOAS. Начальные проявления остеоартроза правого коленного сустава (Рисунок 4.6).

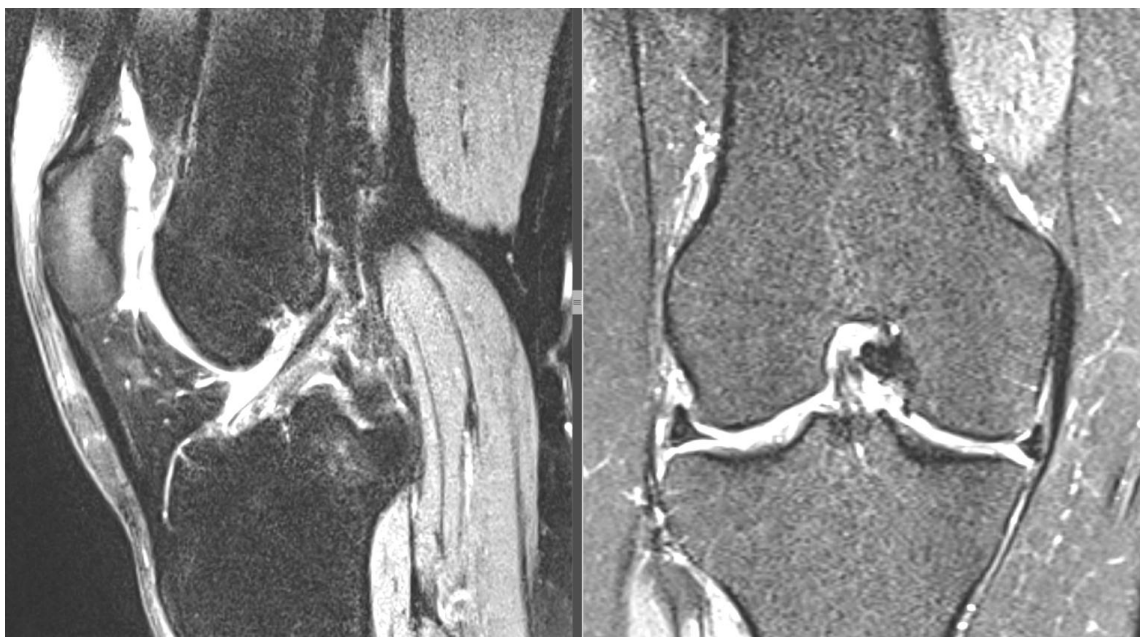


Рисунок 4.6 – Пациентка Ю.: МРТ правого коленного сустава

Пациентка госпитализирована в плановом порядке спустя 3 недели с момента травмы для выполнения артроскопического шва медиального мениска правого коленного сустава. При артроскопической ревизии подтвержден разрыв медиального мениска, повреждение ПКС определено как II степени по шкале AAOS. ЗКС не изменена.

При помощи СДО выполнены измерения спектральных параметров ПКС и ЗКС в 9 точках в соответствии с описанной методикой (затраченное дополнительное время на выполнение исследования – 11 мин), рассчитаны спектры отражения и эффективного поглощения (Рисунок 4.7).

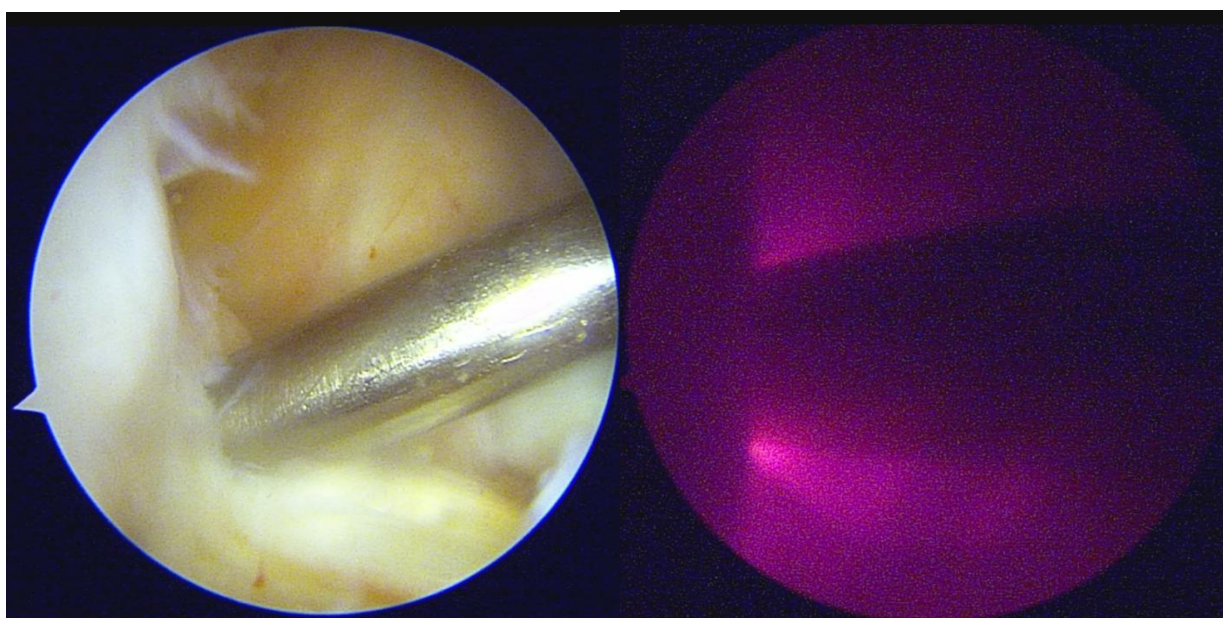


Рисунок 4.7 – Пациентка Ю.: СДО-исследование

Показатели, полученные для ЗКС, подтвердили ее интактность. Для ПКС в ближнем инфракрасном диапазоне 910 нм значение спектра составило  $OD(\lambda)=0.068369371308179724$ , что соответствует диапазону повреждения 3 степени по нашей классификации. В среднем инфракрасном диапазоне 1200 нм среднее значение спектра составило  $OD(\lambda)=0.6272597563212676$ , что также соответствует 3 степени повреждения. Поскольку полное повреждение ПКС подтверждено данными СДО-исследования в обоих инфракрасных спектрах, диагноз признан достоверным, в ход операции внесены коррективы – дополнительно к первоначальному плану

выполнена пластика ПКС с использованием в качестве аутотрансплантата сухожилия длинной малоберцовой мышцы по стандартной методике. Детальное исследование эксплантированной в ходе операции ПКС подтвердило ее полный разрыв и, соответственно, правомочность примененной тактики. Реабилитационный период проведен в соответствии с протоколом № 3. Осложнений нет. Функция коленного сустава восстановлена полностью, жалоб нет, пациентка довольна результатом и расценивает его как отличный.

Данный клинический пример демонстрирует выявление тяжелого поражения крестообразной связки коленного сустава с помощью СДО в том случае, когда ни МРТ, ни артроскопическая ревизия не позволили это сделать, полагая повреждение лишь частичным. Можно предположить, что при отсутствии возможности выполнения СДО пластика ПКС не была бы произведена, что в последующем могло привести к нарастающей дисфункции, прогрессированию остеоартроза и нестабильности коленного сустава, снижению качества жизни и необходимости выполнения пластики ПКС уже в более отдаленные сроки.

### **Клинический пример № 2**

Пациентка В. 26 лет. Жалобы на боли в правом коленном суставе при физической нагрузке. Из анамнеза: 4 недели назад упала во время катания на коньках. После травмы обратилась за медицинской помощью в травмпункт, выполнена рентгенография правого коленного сустава – патологии не обнаружено. Рекомендовано консервативное лечение – нестероидные противовоспалительные препараты, физиотерапия, ограничение физических нагрузок. Лечение без положительной динамики.

При осмотре – область правого коленного сустава обычной конфигурации. Амплитуда активных и пассивных движений в правом коленном суставе в пределах физиологической нормы. Выпота в полости коленного сустава нет. Тест Лахмана отрицательный, тест переднего и заднего выдвигающего ящика отрицательный.

По данным МРТ правого коленного сустава – разрыв заднего рога медиального мениска. ПКС и ЗКС без патологии (0 тип по ACLOAS). Начальные проявления артроза правого коленного сустава. Наличие незначительного количества выпота в полости сустава (Рисунок 4.8).

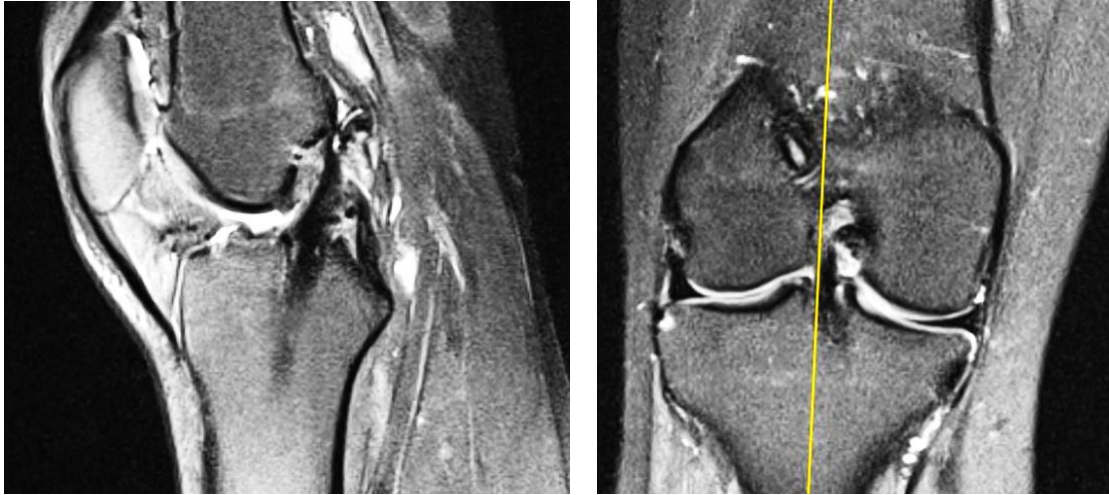


Рисунок 4.8 – Пациентка В.: МРТ правого коленного сустава

Пациентка госпитализирована в плановом порядке спустя 4 недели с момента травмы для артроскопической парциальной резекции повреждённых фрагментов медиального мениска правого коленного сустава. При артроскопической ревизии подтвержден разрыв заднего рога медиального мениска, ПКС и ЗКС без патологических изменений – I степень по шкале AAOS (Рисунок 4.9).

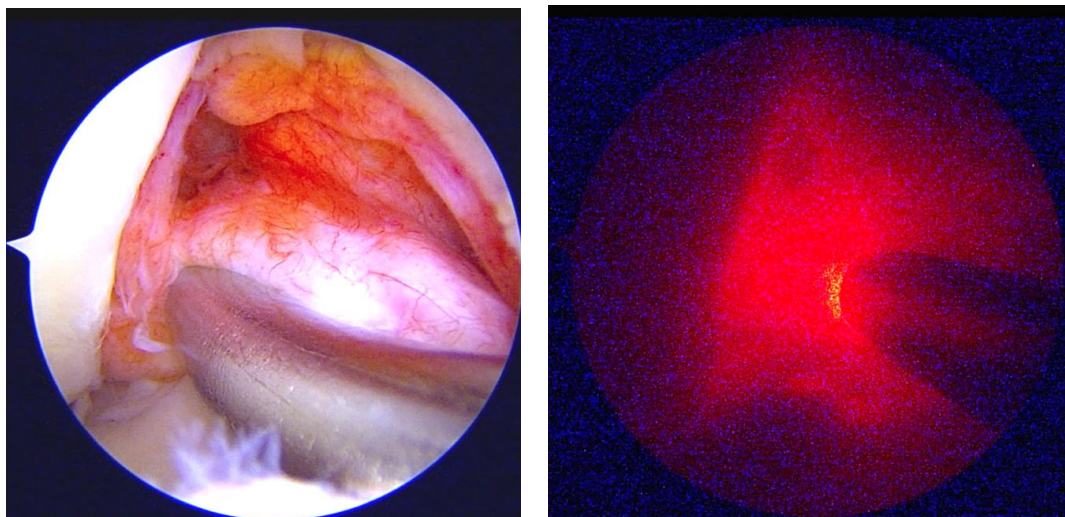


Рисунок 4.9 – Пациентка В.: СДО-исследование (Б)



При помощи СДО выполнены измерения спектральных параметров ПКС и ЗКС в 9 точках в соответствии с описанной методикой (затраченное дополнительное время на выполнение исследования – 9 мин), рассчитаны спектры отражения и эффективного поглощения. Показатели, полученные для ЗКС, подтвердили ее интактность. Для ПКС в ближнем инфракрасном диапазоне 910 нм значение спектра составило  $OD(\lambda)=0.0220517068171661659$ , что соответствует диапазону повреждения 2 степени по нашей классификации. В среднем инфракрасном диапазоне 1200 нм среднее значение спектра составило  $OD(\lambda)=0.535207078328531$ , что соответствует верхней границе диапазона 1 степени повреждения. Таким образом, данные СДО-исследования в обоих инфракрасных диапазонах свидетельствовали о повреждении ПКС, однако степени патологии показали разные. Поскольку в нашем алгоритме в качестве основных определены результаты, полученные в ближнем инфракрасном диапазоне (910 нм), окончательным диагнозом признано повреждение 2 степени по нашей классификации, тем более что отличие тактики в данном случае заключалось только в избрании после выполнения парциальной резекции поврежденного мениска усиленного протокола реабилитации с более длительной разгрузкой конечности (вариант № 2). Послеоперационное течение без осложнений. Пациентка после проведения курса реабилитации вернулась к труду, жалоб нет, результат оценивает как отличный.

Данный клинический пример демонстрирует выявление частичного повреждения ПКС в том случае, когда ни МРТ, ни артроскопическая ревизия не позволили это сделать. Можно предположить, что при отсутствии возможности выполнения СДО реабилитационный период был бы проведен по протоколу № 1 с разрешением ранней функциональной нагрузки, что создало бы опасность усугубления повреждения ПКС вплоть до ее полного разрыва и формирования хронической нестабильности.

### Клинический пример № 3

Пациент А, 41 год. Жалобы на боли в левом коленном суставе при спортивной нагрузке, припухлость сустава. Из анамнеза: травма левого коленного сустава 1 месяц назад во время занятия спортом на любительском уровне (футбол). После травмы обратился в травматологический пункт, на рентгенографии левого коленного сустава патологии не выявлено. Назначена консервативная терапия: нестероидные противовоспалительные препараты, физиотерапия, ограничение физических нагрузок, ношение мягкого наколенника. Лечение без стойкого положительного эффекта: спустя 1 месяц с момента травмы состояние ухудшилось – появилась боль при обычной ходьбе. Занятия спортом пришлось прекратить, что пациент расценил как заметное ухудшение качества жизни.

При осмотре – область левого коленного сустава обычной конфигурации. Амплитуда активных и пассивных движений в левом коленном суставе в пределах физиологической нормы. Выпота в коленном суставе нет. Тест Лахмана отрицательный, тест переднего выдвигающего ящика слабоположительный (+).

По данным МРТ левого коленного сустава – дегенеративный разрыв медиального мениска, признаки повреждения ПКС 2 типа по шкале ACLOAS. Начальные проявления остеоартроза правого коленного сустава (Рисунок 4.10).



Рисунок 4.10 – Пациент А.: МРТ левого коленного сустава

Пациент госпитализирован в плановом порядке для артроскопической парциальной резекции медиального мениска левого коленного сустава. При артроскопической ревизии выявлен дегенеративный разрыв медиального мениска, состояние ПКС оценено как повреждение II степени по шкале AAOS, то есть предоперационный диагноз, установленный по данным МРТ, подтвержден (Рисунок 4.11). Задняя крестообразная связка без патологии.

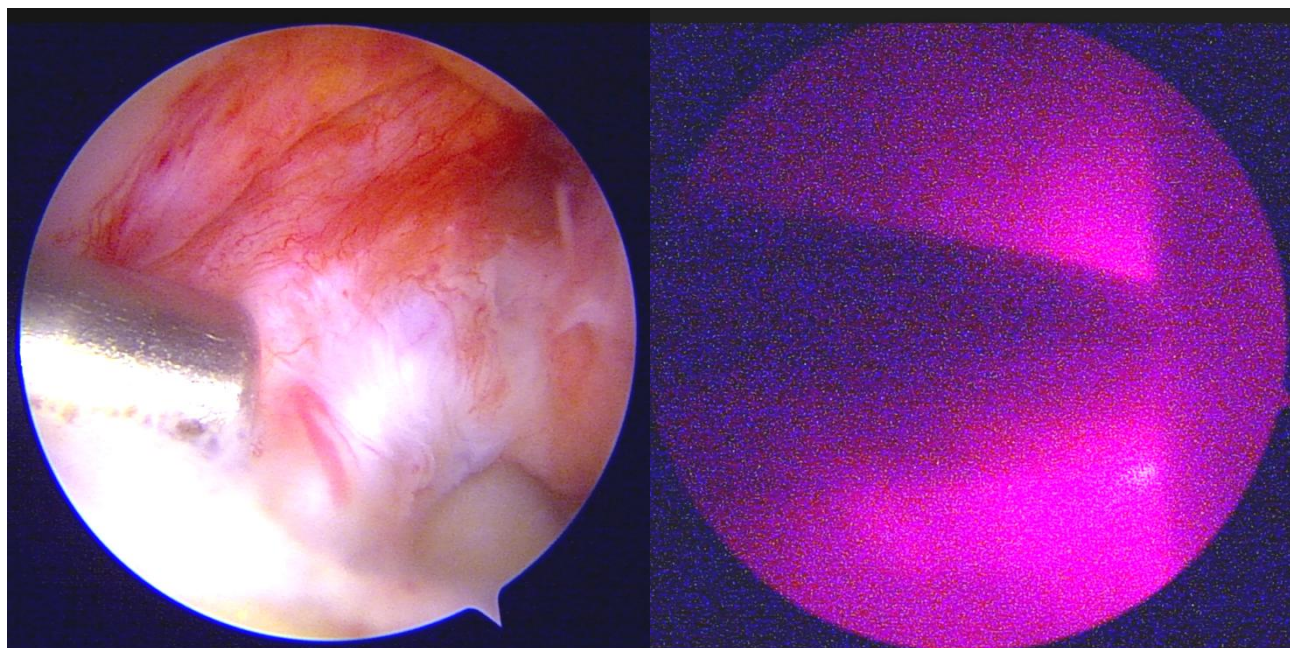


Рисунок 4.11 – Пациент А.: СДО-исследование (Б)

При помощи СДО выполнены измерения спектральных параметров ПКС и ЗКС в 9 точках в соответствии с описанной методикой (затраченное дополнительное время на выполнение исследования – 10 мин), рассчитаны спектры отражения и эффективного поглощения. Показатели, полученные для ЗКС, подтвердили ее интактность. Для ПКС в ближнем инфракрасном диапазоне 910 нм значение спектра составило  $OD(\lambda) = -0.011229300668373775$ , что соответствует диапазону повреждения 1 степени по нашей классификации. В среднем инфракрасном диапазоне 1200 нм среднее значение спектра составило  $OD(\lambda) = 0.5123830085706702$ , что также соответствует 1 степени повреждения. Таким образом, данные СДО-исследования в обоих инфракрасных диапазонах свидетельствовали о повреждении ПКС 1 степени. Поскольку 1 степень повреждения ПКС подтверждена данными

СДО-исследования в обоих инфракрасных спектрах, именно этот диагноз признан достоверным, и после выполнения артроскопической парциальной резекции поврежденного мениска в послеоперационном периоде был применен реабилитационный протокол № 1 (традиционный). Осложнений нет. Функция коленного сустава восстановлена полностью, жалоб нет, пациент вернулся к занятиям любительским спортом, доволен результатом и расценивает его как отличный.

Данный клинический пример демонстрирует возможность уточнения диагноза в отношении состояния ПКС с помощью использования методики СДО – была определена более легкая степень патологии ПКС (1-я по нашей классификации вместо II по AAOS), что позволило в послеоперационном периоде вместо реабилитационного протокола № 2 (усиленного), рекомендованного при поражении ПКС II степени по AAOS, применить протокол № 1 (традиционный), тем самым существенно сократив период реабилитации, избежав при этом осложнений и получив результат, полностью удовлетворивший пациента.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В период с 2023 по 2025 год на базе Клиники травматологии, ортопедии и патологии суставов Клинического центра и кафедры травматологии, ортопедии и хирургии катастроф ФГАОУ ВО Первый МГМУ им. И.М. Сеченова Минздрава России (Сеченовский Университет) было проведено исследование, направленное на улучшение точности диагностики состояния крестообразных связок коленного сустава. Обоснованием исследования явилась важность своевременного распознавания наличия и степени тяжести патологии крестообразных связок, что определяет выбор лечебной тактики, включая их хирургическую реконструкцию. Микроструктурные нарушения, включающие клеточные изменения и дезорганизацию внеклеточного матрикса, изменяют механические свойства крестообразных связок. Вместе с тем, существующие методы неинвазивной (МРТ) и даже инвазивной (артроскопическая ревизия) диагностики не всегда позволяют дифференцировать степень поражения крестообразных связок, особенно при их частичных разрывах, что приводит к запоздалой диагностике и, соответственно, несвоевременному выполнению исчерпывающего лечения.

Исследование состояло из двух этапов – экспериментального и клинического.

### Экспериментальный этап

Перед экспериментальным этапом была поставлена задача изучить возможность повышения точности определения состояния крестообразных связок коленного сустава за счет применения методов оптической спектроскопии, и на этой основе создать рабочую классификацию и алгоритм выбора оптимальной лечебной тактики.

Для проведения эксперимента мы выбрали три методики спектроскопии, которые по данным литературы в наибольшей степени могли по своим

характеристикам и описанным авторами возможностям соответствовать решению поставленных нами задач:

1. Спектроскопия диффузного отражения.
2. Рамановская спектроскопия.
3. Флуоресцентная спектроскопия.

Объектом исследования на экспериментальном этапе были экспланты крестообразных связок, полученные у пациентов в ходе плановых операций первичного тотального эндопротезирования коленных суставов, выполняемых в нашей клинике. Всем пациентам в предоперационном периоде было выполнено МРТ-исследование. Условием включения пациентов было выявление в предоперационном периоде по данным МРТ наличия повреждения хотя бы одной крестообразной связки типа 1 или 2 по классификации ACLOAS. Таким образом, пациенты с очевидными полными разрывами крестообразных связок не были включены в этот эксперимент.

В ходе операции после артротомии состояние крестообразных связок оценивали визуально и тактильно по классификации AAOS, после чего их изымали единым блоком с костными блоками в местах прикрепления к бедренной и большеберцовой костям. У каждого пациента стремились получить 2 экспланта, что позволило сформировать репрезентативную выборку для статистического анализа. После каждого оперативного вмешательства проводилась обязательная верификация полученных эксплантов на предмет ятрогенных повреждений. Допущенные при взятии эксплантов технические погрешности, не позволившие получить эксплант, пригодный для полноценного исследования, явились критерием невключения. Таким образом, всего было исследовано 30 эксплантов, взятых у 24 пациентов.

Далее полученные образцы отмывали в физрастворе и подвергали спектроскопическому исследованию в 9 точках:

- 3 точки в области бедренного энтеза;
- 3 точки в средней части связки;
- 3 точки в области большеберцового энтеза.

Эту часть исследования провели совместно с сотрудниками лаборатории клинической биофотоники Института регенеративной медицины ФГАОУ ВО Первый МГМУ им. И.М. Сеченова Минздрава России (Сеченовский Университет). Использовали все 3 вышеупомянутые методики спектроскопии. При учете, что каждое измерение повторялось 2-3 раза, а также с учетом выборки пациентов, общий объем данных соответствовал 270 исследованным участкам крестообразных связок. На экспериментальном этапе было проанализировано более 750 различных спектров.

Флуоресцентную спектроскопию проводили на различных длинах волн в диапазоне возбуждения от 325 до 450 нм, так как эти значения охватывают основные спектральные особенности, обусловленные ключевыми флуоресцентными маркерами биологических тканей. В ходе экспериментов были получены спектры флуоресценции для каждого образца, которые продемонстрировали вариабельность оптических свойств в зависимости от длины волны возбуждения. Анализ результатов проведенного эксперимента показал, что флуоресцентная спектроскопия не позволяет однозначно дифференцировать степень повреждения эксплантов в соответствии с классификацией AAOS, так как полученные показатели даже в рамках одной степени поражения существенно отличаются. Этот метод после сбора достоверного количества спектральных данных (около 150 спектров) было принято считать неприменимым для оценки патологических изменений крестообразных связок.

Для анализа эксплантатов также применялась Рамановская спектроскопия с использованием источника света с длиной волны 690 нм. В Рамановской спектроскопии для нивелирования аппаратных факторов и различного времени накопления принято использовать отношения интенсивностей пиков. Нормирование проводилось на самые интенсивные полосы:  $1270\text{ см}^{-1}$  (маркер функционального коллагена) и  $1450\text{ см}^{-1}$  (маркер белков/липидов). Результаты Рамановской спектроскопии показали возможность достаточно эффективно дифференцировать состоятельную (неповрежденную или незначительно поврежденную) связку, состояние которой соответствовало I степени по AAOS, от

повреждений II и III степени. Тем не менее, дифференциация между II и III степенью дегенерации оказалась практически невозможной, что снижает диагностическую ценность метода для клинического применения.

Спектроскопию диффузного отражения выполняли в ближнем (800-1050 нм) и среднем (1050-1800 нм) инфракрасном диапазонах с использованием двух спектрометров:

1. QE2000pro (OceanOptics, США) для диапазона 800-1050 нм (ближний ИК-диапазон).

2. AvaSpec-NIR256-2.5-HSC (Avantes BV, Нидерланды) для диапазона 1050-1800 нм (средний ИК-диапазон).

Для регистрации спектров СДО был применен зондовый оптический модуль собственной разработки, включавший три оптоволоконных проводника – один проводник служил для подачи широкополосного излучения на образец, два других проводника служили приёмниками света, испытывавшего рассеяние и поглощение в толще исследуемого эксплантата. В качестве источника света использовалась вольфрам-галогеновая лампа со сплошным спектром излучения (Thorlabs, Германия). Для обеспечения достоверности измерений перед каждой серией экспериментов проводились калибровки – измерялся эталонный спектр лампы от стандарта диффузного отражения (белый эталон) и регистрировался фоновый спектр. Анализ полученных результатов показал, что наиболее статистически значимые отличия, позволяющие уверенно дифференцировать все 3 степени тяжести поражения эксплантатов, получены в ближнем инфракрасном диапазоне с длиной волны 910 нм. Исследование с данными параметрами и решено считать основным для уточненной диагностики. В качестве вспомогательного определено исследование в среднем инфракрасном диапазоне с длиной волны 1200 нм, которое позволяло статистически значимо отличать I степень поражения по ААОС от II и III степени, однако не позволяло уверенно отличить II и III степени, так как полученные данные частично перекрывались. Однако, исследование в данном диапазоне мы также включили в свой диагностический протокол, так как считали



наиболее важным проводить различие именно между начальными степенями поражения связок.

Таким образом, по результатам проведенного эксперимента мы определили, что для решения поставленных нами задач в наибольшей степени подходит методика СДО. Исследование в ближнем инфракрасном диапазоне (910 нм) считали основным, и, если показания, полученные в среднем инфракрасном диапазоне (1200 нм), подтверждали оценку состояния связки, полученную в ближнем диапазоне, диагноз считали высокоточным.

По результатам СДО мы разработали рабочую классификацию состояния крестообразных связок, которая была ориентирована на выбор лечебной тактики и коррелировала с известной артроскопической классификацией AAOS, однако была основана не на визуальном осмотре, а на объективных данных спектроскопии, позволяющих учесть внутренние структурные изменения. Классификация состоит из трех степеней:

– 0-1 степень (связка не повреждена или повреждена незначительно с сохранением ее состоятельности (диапазон спектров эффективного поглощения при  $OD(\lambda) 910 \text{ нм} < 0,02$ ; при  $OD(\lambda) 1200 \text{ нм} < 0,54$ );

– 2 степень (диапазон спектров эффективного поглощения при  $OD(\lambda) 910 \text{ нм} 0,02-0,06$ ; при  $OD(\lambda) 1200 \text{ нм} 0,54-0,60$ );

– 3 степень (диапазон спектров эффективного поглощения при  $OD(\lambda) 910 \text{ нм} > 0,06$ ; при  $OD(\lambda) 1200 \text{ нм} > 0,56$ ).

Из классификации видно, что параметры, определенные для II и III степеней поражения связки во вспомогательном, среднем инфракрасном диапазоне, частично «перекрываются».

В соответствии с классификацией, мы разработали алгоритм выбора лечебной тактики, позволяющий корректировать или подтвердить план оперативного вмешательства непосредственно в операционной после обследования крестообразных связок методом СДО в ближнем и среднем ИК-диапазонах. Согласно алгоритму при 3 степени повреждения ПКС показана аутопластика связки, а при 1 и 2 степени – проведение реабилитационного лечения

без ее реконструкции. В отношении ЗКС при сохранении состоятельности других структур, стабилизирующих коленный сустав, считали возможным отказаться от ее пластики даже при 3 степени повреждения, верифицированной спектроскопически. Отличия в лечебной тактике заключались в применении разных реабилитационных протоколов. В случаях определения полного разрыва крестообразных связок (ПКС или ЗКС) с помощью клинического обследования, МРТ и диагностического этапа артроскопии, выполнение СДО считали излишним, так как и без этого дополнительного исследования диагноз был очевиден. Алгоритмом была предусмотрена возможность коррекции диагноза при определении повреждения связки как I степени по AAOS в сторону отягощения степени патологии до 2 степени по нашей классификации, а также при определении повреждения связки как II степени по AAOS в сторону как отягощения степени патологии до 3 степени по нашей классификации, так и снижения тяжести до 0-1 степени.

В зависимости от окончательного диагноза, верифицированного с помощью СДО, выделяли 3 варианта послеоперационного реабилитационного протокола: при 1 степени – традиционный (вариант № 1): реконструкцию связки не выполняли, разгрузка оперированной конечности 1,5 недели; при 2 степени – усиленный (вариант № 2): реконструкцию связки не выполняли, разгрузка оперированной конечности до 6 недель; при 3 степени (вариант № 3): после пластики ПКС по стандартной схеме, регламентированной Клиническими рекомендациями РФ, с ношением шарнирного ортеза; тот же протокол применяли и при изолированном полном разрыве ЗКС.

### **Клинический этап**

Перед клиническим этапом была поставлена задача определить эффективность дополнительного исследования состояния крестообразных связок коленного сустава с помощью СДО в отношении коррекции ранее установленного диагноза.

В исследование были включены 15 пациентов среднего возраста 35,5 лет со сроком давности после получения травмы не более 6 недель, которым при клиническом и лучевом обследовании были определены показания к выполнению артроскопии коленного сустава. Эти показания первоначально не были связаны с лечением повреждений крестообразных связок, так как по данным МРТ состояние крестообразных связок оценивали как 0-2 тип по классификации ACLOAS, а пациентов с 3 типом (полный разрыв) в исследование не включали. Все пациенты дали согласие на возможное изменение плана операции по итогам дополнительного СДО-исследования, проведенного интраоперационно.

В ходе диагностического этапа артроскопии предоперационный диагноз наличия и степени поражения крестообразных связок был подтвержден или скорректирован, после чего выполняли СДО. Всего было у 15 человек обследовано 15 ПКС и 15 ЗКС. Отличие этого исследования от проведенного в эксперименте заключалось в том, что его выполняли в ходе реальной операции не на эксплантах, а на живых тканях в жидкостной среде. Выполнение СДО заняло в среднем 10,1 мин, что клинически значимо не отразилось на продолжительности операции.

В результате при обследовании ПКС с применением методики СДО первоначальный предварительный диагноз, установленный с помощью МРТ, был уточнен и скорректирован в 7 случаях из 15 (46,7%), причем в 3 случаях (20,0%) вместо частичного выявлен полный разрыв ПКС, что повлекло изменение плана операции с выполнением аутопластики поврежденной связки. Артроскопическая диагностика была более точна – установленная с ее помощью степень поражения ПКС была скорректирована при помощи СДО только в 3 наблюдениях (20,0%). При обследовании ЗКС первоначальный диагноз был скорректирован в 2 случаях в сторону более тяжелой патологии (13,3%).

Таким образом, применение СДО в качестве дополнительного диагностического исследования состояния крестообразных связок коленного сустава в ходе артроскопии позволило скорректировать первоначальный диагноз в 9 случаях (30,0%), при этом у трех пациентов перейдя к пластике поврежденной

связки, а у остальных 6 человек изменив протокол послеоперационной реабилитации.

Послеоперационное наблюдение за пациентами клинического этапа исследования показало отсутствие рецидивов жалоб и дисфункции оперированного сустава, что позволило считать избранную тактику адекватной. Все пациенты вернулись к активной жизни и довольны результатами проведенного лечения. Результаты выполненных в соответствии с разработанным алгоритмом операций показали, что функция коленного сустава, оцениваемая как «отличная» или «хорошая», достигнута по шкале KOOS у 100% пациентов, по IKDS – у 86,6%, по Lysholm – у 80%, что, как минимум, не хуже результатов, приводимых в доступных литературных источниках в отношении лечения аналогичных контингентов пациентов. Более подробный анализ результатов лечения не входил в задачи данного исследования, которое было посвящено разработке и обоснованию эффективности методики уточненной диагностики состояния крестообразных связок коленного сустава.

Таким образом, спектроскопия диффузного отражения является эффективной методикой в отношении уточненной диагностики повреждений крестообразных связок коленного сустава, обладает явной диагностической чувствительностью к патологическим изменениям крестообразных связок. Статистически значимые различия между группами были количественно подтверждены как в ближнем, так и в среднем ИК-диапазонах. Наблюдаемые спектральные характеристики предоставляют объективные, количественно определяемые биомаркеры. Точная количественная оценка и качественная классификация патологии крестообразных связок имеют первостепенное значение для обоснованного планирования лечения. Интеграция оптической спектроскопии значительно повысит точность артроскопических данных и потенциально произведет значимое улучшение в клинической практике. Среднее время, необходимое для спектроскопического измерения связок, не привело к существенному увеличению общей продолжительности операции. Переход к точному количественному анализу тканей снизит общие расходы здравоохранения

за счет уменьшения как операционных, так и административных расходов. В конечном итоге, данное исследование демонстрирует потенциал спектроскопического исследования как ценного инструмента интраоперационной диагностики внутрисуставной патологии, открывая путь к более персонализированному подходу к лечению коленного сустава. Интраоперационное выполнение СДО можно рекомендовать во всех случаях, когда полный разрыв крестообразных связок не очевиден по данным МРТ и последующей артроскопической ревизии.

## ВЫВОДЫ

1. Спектроскопия диффузного отражения в ближнем (910 нм) и среднем (1200 нм) инфракрасном диапазонах позволяет определить структурные изменения крестообразных связок коленного сустава, отличая норму от частичного и полного разрывов со степенью статистической значимости в зависимости от степени поражения от  $p < 0,05$  до  $p < 0,0001$ .

2. Интраоперационная методика оценки состояния крестообразных связок коленного сустава, основанная на спектроскопии диффузного отражения, позволила для ПКС уточнить диагноз, установленный с помощью МРТ (по классификации ACLOAS), в 46,7% случаев, а при помощи артроскопической ревизии (по классификации AAOS) – в 20,0% случаев. Для ЗКС – частота коррекции предоперационного и артроскопического диагнозов составила 13,3%.

3. Созданная классификация поражений крестообразных связок коленного сустава, основанная на данных, полученных с помощью спектроскопии диффузного отражения, легла в основу разработанного лечебно-диагностического алгоритма, применение которого в ходе клинического этапа исследования позволило существенно скорректировать лечебную тактику, выполнив ранее не запланированную аутопластику повреждённых связок у 13,3% пациентов, и в 16,7% случаях изменив реабилитационный протокол.

4. Применение разработанной методики лечения пациентов с патологией коленного сустава, включающей выполнение уточненной интраоперационной диагностики с помощью спектроскопии диффузного отражения, существенно не увеличило время операции (в среднем на 10,1 мин), но позволило избежать осложнений и рецидивов, связанных с патологией крестообразных связок коленного сустава.

## ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ

1. Для уточненной диагностики состояния крестообразных связок коленного сустава традиционные методы обследования целесообразно дополнить интраоперационным выполнением спектроскопии диффузного отражения, что позволит скорректировать хирургическую тактику в соответствии с полученными результатами. Такое исследование рекомендовано проводить с помощью спектрометров, регистрирующих отклик в ближнем (910 нм) и в среднем (1200 нм) инфракрасном диапазонах, позволяющих получить наиболее статистически значимые результаты для определения степени поражения связок. Как источник света целесообразно использовать вольфрам-галогеновую лампу со сплошным спектром излучения. Оптоволоконные проводники для спектрометров и источника света целесообразно подключать к приёмо-передающему зонду разработанной нами конструкции.

2. Разработанную на основе данных спектроскопии диффузного отражения классификацию степени поражения крестообразных связок коленного сустава рекомендовано использовать для выбора оптимальной лечебной тактики в соответствии с созданным алгоритмом. Основными для установки диагноза являются данные, полученные в ближнем инфракрасном диапазоне (910 нм), а при совпадении этой оценки с результатами, полученными в среднем инфракрасном диапазоне (1200 нм), диагноз можно считать высокоточным и руководствоваться им для определения лечебной тактики – выполнению аутопластики связки или выбора реабилитационного протокола в послеоперационном периоде.

3. Интраоперационную спектроскопию диффузного отражения для уточнения степени поражения крестообразных связок коленного сустава целесообразно выполнять во всех случаях ее предварительной оценки 1 или 2 типа по данным МРТ (классификация ACLOAS), и I или II степени по данным артроскопической ревизии (классификация AAOS), так как наше исследование показало достаточно высокую частоту недооценки тяжести структурных изменений, что может потребовать коррекции лечебной тактики.

**СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ**

ЗКС – задняя крестообразная связка

ИК-спектроскопия – инфракрасная спектроскопия

МРТ – магнитно-резонансная томография

ПКС – передняя крестообразная связка

РС – Рамановская спектроскопия

СДО – спектроскопия диффузного отражения

ФГАОУ ВО Первый МГМУ им. И.М. Сеченова Минздрава России (Сеченовский Университет) – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования Первый московский государственный медицинский университет им. И.М. Сеченова

ФС – флуоресцентная спектроскопия

AAOS – American Academy of Orthopaedic Surgeons

ACLOAS (Anterior Cruciate Ligament OsteoArthritis Score) – «шкала оценки остеоартрита передней крестообразной связки»



**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Анастасиева, Е. А. Актуальные вопросы хирургического лечения повреждений передней крестообразной связки (обзор литературы) / Е. А. Анастасиева, Р. О. Симагаев, И. А. Кирилова // Гений ортопедии. – 2020. – Т. 26. – № 1. – С. 117-128. – DOI: 10.18019/1028-4427-2020-26-1-117-128.

2. Биомедицинская фотоника в задачах интраоперационной диагностики : обзор возможностей и клинических применений / Е. А. Ширшин, Б. П. Якимов, Г. С. Будылин [и др.] // Вестник Московского университета. Серия 3: Физика, астрономия. – 2022. – Т. 77. – № 6. – С. 3-18.

3. Биомеханическая модель надколенника в норме и при повреждении медиальной пателлофemorальной связки / Е. Б. Калинин, А. С. Юрова, А. В. Лычагин, Г. М. Кавалерский [и др.] // Кафедра травматологии и ортопедии. – 2024. – № 2(56). – С. 45-52. – DOI: 10.17238/2226-2016-2024-2-45-52.

4. Гончарук, Ю. Р. Оптическая спектроскопия в диагностике интраартикулярных повреждений коленного сустава : диссертация ... кандидата медицинских наук : 3.1.8 ; 1.5.22 / Гончарук Юлия Романовна ; [Место защиты : ФГАОУ ВО «Первый МГМУ им. И.М. Сеченова» Минздрава России]. – Москва, 2023. – 166 с.

5. Зарипов, А. Р. Лечение пациентов с разрывом задней крестообразной связки : диссертация ... кандидата медицинских наук : 3.1.8. / Зарипов Азиз Римович ; [Место защиты : ФГАОУ ВО «Российский университет дружбы народов» ; Диссовет ПДС 0300.013]. – Москва, 2023. – 137 с.

6. Клиническая эффективность анатомической пластики передней крестообразной связки коленного сустава / В. В. Заяц, А. К. Дулаев, А. В. Дыдыкин, И. Н. Ульяновченко // Гений ортопедии. – 2021. – Т. 27. – № 1. – С. 48-54. – DOI: 10.18019/1028-4427-2021-27-1-48-54.

7. Клинические результаты анатомической пластики передней крестообразной связки аутотрансплантатом «кость-сухожилие-кость» / И. А. Сучилин, Д. А. Маланин, А. Л. Жуликов, М. В. Демещенко // Вестник

Волгоградского государственного медицинского университета. – 2019. – Т. 71. – № 3. – С. 120-123. – DOI: 10.19163/1994-9480-2019-3(71)-120-123.

8. Клинический опыт имплантации сфероидов аутологичных хондроцитов человека для лечения дефектов хряща коленного сустава / А. В. Лычагин, А. А. Свистунов, Е. Б. Калинин, А. В. Гаркави [и др.] // Кафедра травматологии и ортопедии. – 2025. – № 4. – С. 53-61. – DOI: 10/17238/issn2226-2016.2025.4.53-61.

9. Консервативное лечение острых повреждений задней крестообразной связки у спортсменов / А. Р. Зарипов, А. П. Афанасьев, Н. Е. Магнитская, А. Н. Логвинов [и др.] // Научно-практическая ревматология. – 2022. – Т. 60. – № 2. – С. 228-232. – DOI: 10.47360/1995-4484-2022-228-232.

10. Механическая прочность фиксации имплантатов передней крестообразной связки / В. Б. Богатов, А. В. Лычагин, А. Р. Дрогин, Е. А. Чекулаев // Российский журнал биомеханики. – 2018. – Т. 22. – № 3. – С. 390-397. – DOI: 10.15593/RZhBiomeh/2018.3.09.

11. Монастырев, В. В. Лечение повреждения передней крестообразной связки коленного сустава [Электронный ресурс] / В. В. Монастырев, С. Н. Леонова // Медицинский вестник Северного Кавказа. – 2020. – Т. 15. – № 1. – С. 87-90. – DOI: 10.14300/mnnc.2020.15020. – URL: [http://medvestnik.stgmu.ru/en/articles/1002-Treatment\\_of\\_anterior\\_cruciate\\_ligament\\_in\\_Juries.html](http://medvestnik.stgmu.ru/en/articles/1002-Treatment_of_anterior_cruciate_ligament_in_Juries.html) (дата обращения: 27.12.2025).

12. Наумик, А. В. Спектроскопия комбинационного рассеяния света в микробиологической диагностике : достижения, преимущества, перспективы / А. В. Наумик // Журнал микробиологии, эпидемиологии и иммунобиологии. – 2013. – № 4. – С. 100-110.

13. Новый способ определения диагностических параметров суставного хряща : от теории к практике (клинический пример) / Б. Д. Райков, К. М. Азаркин, А. В. Лычагин, Ю. Р. Гончарук [и др.] // Кафедра травматологии и ортопедии. – 2023. – Т. 51. – № 1. – С. 73-81. – DOI: 10.17238/2226-2016-2023-1-73-81.

14. Определение возможности применения метода Рамановской спектроскопии для выявления несостоятельности крестообразных связок

коленного сустава [Электронный ресурс] / А. В. Лычагин, Е. Б. Калинин, К. М. Азаркин, А. В. Гаркави [и др.] // Современные проблемы науки и образования. – 2026. – № 3. – URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=34489> (дата обращения: 09.03.2026).

15. Оптическая спектроскопия в диагностике раннего остеоартрита (обзор литературы) / Ю. Р. Гончарук, М. М. Липина, А. В. Лычагин, П. С. Тимашев [и др.] // Кафедра травматологии и ортопедии. – 2022. – Т. 49. – № 3 (49). – С. 77-89. – DOI: 10.17238/2226-2016-2022-3-77-89.

16. Основные принципы послеоперационной реабилитации после первичной изолированной пластики передней крестообразной связки у молодых физически активных пациентов / А. А. Ветошкин, Е. Н. Гончаров, А. А. Коврижина, И. И. Радыш [и др.] // Спортивная медицина : наука и практика. – 2025. – Т. 15. – № 1. – С. 5-16. – DOI: 10.47529/2223-2524.2025.1.2.

17. Оценка проприоцептивной функции у пациентов после восстановления передней крестообразной связки / Д. А. Романов, А. В. Гаркави, А. Р. Дрогин, А. А. Шишова [и др.] // Вестник современной клинической медицины. – 2022. – Т. 15. – № 5. – С. 58-65. – DOI: 10.20969/VSKM.2022.15(5).58-65.

18. Патент № 2843437 С1 Российская Федерация, МПК А61В 17/56, А61В 1/317. Способ диагностики повреждений суставного хряща и мениска коленного сустава / Лычагин А. В., Гончарук Ю. Р., Липина М. М., Калинин Е. Б., Петров П. И., Погосян Д. А., Азаркин К. М., Тимашев П. С., Ефремов Ю. М., Сережникова Н. Б., Ширшин Е. А., Будылин Г. С., Ровнягина Н. Р., Дьяконов П. В. ; заявитель и патентообладатель ФГАОУ ВО Первый МГМУ им. И.М. Сеченова Минздрава России (Сеченовский Университет) // Patents.Google : официальный сайт. – № 2024127650 ; заявл. 08.11.2024 ; опубл. 14.07.2025. – URL: <https://patents.google.com/patent/RU2843437C1/ru> (дата обращения: 25.12.2025).

19. Повреждения задней крестообразной связки : биомеханика, основные направления диагностики, лечения и профилактики вторичного остеоартрита / А. В. Королев, А. П. Афанасьев, Д. О. Ильин, Д. О. Герасимов [и др.] // Гений

ортопедии. – 2020. – Т. 26. – № 3. – С. 413-419. – DOI: 10.18019/1028-4427-2020-26-3-413-419.

20. Применение сухожилия длинной малоберцовой мышцы при пластике передней крестообразной связки : биомеханические свойства трансплантата, корреляционные взаимосвязи / А. В. Лычагин, Р. И. Алиев, В. Б. Богатов, С. Н. Чурбанов [и др.] // Российский журнал биомеханики. – 2020. – Т. 24. – № 4. – С. 505-512. – DOI: 10.15593/RZhBiomeh/2020.4.08.

21. Пупынин, Д. Ю. Сравнительный анализ пятилетних результатов применения различных методик лечения разрывов передней крестообразной связки / Д. Ю. Пупынин, А. В. Лычагин, А. А. Грицюк // Гений ортопедии. – 2024. – Т. 30. – № 3. – С. 337-344. – DOI: 10.18019/1028-4427-2024-30-3-337-344.

22. Регенеративная медицина : учебник / А. А. Антошин, П. С. Артамонова, К. Н. Бардакова, Н. А. Басалова [и др.] ; под редакцией П. В. Глыбочко, Е. В. Загайнова ; Первый МГМУ им. И.М. Сеченова. – Москва : ГЭОТАР-Медиа, 2023. – 456 с. – ISBN 978-5-9704-7535-5. – Текст : непосредственный.

23. Реинсерция или аутопластика передней крестообразной связки при ее проксимальных разрывах : сравнительное исследование / С. А. Герасимов, Е. А. Морозова, Д. А. Найда, Д. О. Колмаков [и др.] // Травматология и ортопедия России. – 2024. – Т. 30. – № 4. – С. 82-91. – DOI: 10.17816/2311-2905-17562.

24. Рикун, О. В. Современные тенденции в хирургическом лечении пациентов с разрывами передней крестообразной связки (обзор литературы) / О. В. Рикун, В. В. Хоминец, А. О. Федотов // Травматология и ортопедия России. – 2017. – Т. 23. – № 4 (2017). – С. 134-145. – DOI: 10.21823/2311-2905-2017-23-4-134-145.

25. Современные возможности диагностики и лечения разрывов менисков коленного сустава / Т. Р. Кудрачев, К. М. Азаркин, Ю. Р. Гончарук, А. В. Лычагин [и др.] // Кафедра травматологии и ортопедии. – 2022. – № 4 (41). – С. 57-66. – DOI: 10.17238/2226-2016-2022-4-57-66.

26. Современные способы тендопластики передней крестообразной связки (обзор литературы) / И. Н. Михайлов, М. Э. Пусева, Н. В. Тишков,

В. В. Монастырев [и др.] // *Acta Biomedica Scientifica*. – 2017. – Т. 2. – № 6 (2017). – С. 64-68. – DOI: 10.12737/article\_5a0a864c6e0163.65998795.

27. Сравнение результатов восстановления передней крестообразной связки коленного сустава с использованием аутотрансплантата из сухожилия длинной малоберцовой мышцы и из связки надколенника с двумя костными блоками / Е. Н. Гончаров, Н. Г. Гончаров, Е. Н. Безуглов, А. А. Ветошкин [и др.] // *Гений ортопедии*. – 2022. – Т. 28. – № 1. – С. 53-61. – DOI: 10.18019/1028-4427-2022-28-1-53-61.

28. Сравнительный анализ применения аутотрансплантатов при реконструкции передней крестообразной связки коленного сустава (обзор литературы) / К. А. Егиазарян, А. П. Ратьев, В. О. Тамазян, В. И. Силин [и др.] // *Медицинский вестник ГВКГ им. Н.Н. Бурденко*. – 2025. – Т. 6. – № 1 (19). – С. 65-72. – DOI: 10.53652/2782-1730-2025-6-1-65-72.

29. Сравнительный анализ результатов реконструкции передней крестообразной связки различными способами с применением свободных и несвободных аутотрансплантатов / Г. П. Котельников, Н. Д. Щербатов, Д. С. Кудашев, С. Д. Зуев-Ратников // *Травматология и ортопедия России*. – 2025. – Т. 31. – № 3. – С. 50-60. – DOI: 10.17816/2311-2905-17725.

30. Флуоресцентная спектроскопия плазмы крови и спинномозговой жидкости для диагностики глиом головного мозга / П. К. Нургалиева, О. П. Черкасова, Б. П. Якимов, Е. В. Ступак [и др.] // *Оптика и спектроскопия*. – 2025. – Т. 133. – № 5. – С. 544-550. – DOI: 10.61011/OS.2025.05.60794.31-25.

31. Цыганкова, Е. А. Применение спектроскопических методов в исследованиях новообразований в биологических тканях / Е. А. Цыганкова, Ю. С. Корнева // *Вестник Смоленской государственной медицинской академии*. – 2021. – Т. 20. – № 2. – С. 150-156. – DOI: 10.37903/vsgma.2021.2.21.

32. A new method for diagnosing biochemical abnormalities of anterior cruciate ligament (ACL) in human knees : A Raman spectroscopic study / R. Matsunaga, Y. Takahashi, R. H. Takahashi, T. Nagao [et al.] // *Acta Biomaterialia*. – 2019. – Vol. 99. – P. 284-294. – DOI: 10.1016/j.actbio.2019.09.016.

33. Abramczyk, H. Raman Imaging in Biochemical and Biomedical Applications. Diagnosis and Treatment of Breast Cancer / H. Abramczyk, B. Brozek-Pluska // *Chemical Reviews*. – 2013. – Vol. 113. – № 8. – P. 5766-5781. – DOI: 10.1021/cr300147r.

34. Accuracy of Lachman and anterior drawer tests for anterior cruciate ligament injuries / H. Makhmalbaf, A. Moradi, S. Ganji, F. Omidi-Kashani // *Archives of Bone and Joint Surgery*. – 2013. – Vol. 1. – № 2. – P. 94-97.

35. An Anterior Cruciate Ligament Failure Mechanism / J. Chen, J. Kim, W. Shao, S. H. Schlecht [et al.] // *American Journal of Sports Medicine*. – 2019. – Vol. 47. – № 9. – P. 2067-2076. – DOI: 10.1177/0363546519854450.

36. Anatomy of the anterior cruciate ligament / V. B. Duthon, C. Barea, S. Abrassart, J. H. Fasel [et al.] // *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy*. – 2006. – Vol. 14. – № 3. – P. 204-213. – DOI: 10.1007/s00167-005-0679-9.

37. Anterior Cruciate Ligament Injury : Conservative Versus Surgical Treatment / K. Rodriguez, M. Soni, P. K. Joshi, S. C. Patel [et al.] // *Cureus*. – 2021. – Vol. 13. – № 12. – P. e20206. – DOI: 10.7759/cureus.20206.

38. Anterior cruciate ligament osteoarthritis score (ACLOAS) : Longitudinal MRI-based whole joint assessment of anterior cruciate ligament injury / F. W. Roemer, R. Frobell, L. S. Lohmander, J. Niu [et al.] // *Osteoarthritis and Cartilage*. – 2014. – Vol. 22. – № 5. – P. 668-682. – DOI: 10.1016/j.joca.2014.03.006.

39. Application of far-infrared spectroscopy to the structural identification of protein materials / Y. Han, S. Ling, Z. Qi, Zh. Shao [et al.] // *Physical Chemistry Chemical Physics*. – 2018. – Vol. 20. – № 17. – P. 11643-11648. – DOI: 10.1039/c8cp00802g.

40. Applications of Raman spectroscopy in clinical medicine / Y. Qi, E. X. Chen, D. Hu, Y. Yang // *Food Frontiers*. – 2024. – Vol. 5. – № 2. – P. 392-419. – DOI: 10.1002/fft2.335.

41. Arnoczky, S. P. Anatomy of the Anterior Cruciate Ligament / S. P. Arnoczky // *Clinical Orthopaedics and Related Research*. – 1983. – № 172. – P. 19-25. – DOI: 10.1097/00003086-198301000-00006.

42. Arthroscopic Anterior Cruciate Ligament Injury in Clinical Treatment of Joint Complications and CT Observation / C. Ji, Y. Chen, L. Zhu, J. Zhang // *Journal of*

Healthcare Engineering. – 2021. – Vol. 2021. – Article ID 6667046. – DOI: 10.1155/2021/6667046.

43. Barbosa, R. C. S. A Comprehensive Review on Photoacoustic-Based Devices for Biomedical Applications / R. C. S. Barbosa, P. M. Mendes // Sensors. – 2022. – Vol. 22. – № 23. – Article 9541. – DOI: 10.3390/s22239541.

44. Beaulieu, M. L. Loading mechanisms of the anterior cruciate ligament / M. L. Beaulieu, J. A. Ashton-Miller, E. M. Wojtys // Sports Biomechanics. – 2023. – Vol. 22. – № 1. – P. 1-29. – DOI: 10.1080/14763141.2021.1916578.

45. Biomechanical considerations for graft choice in anterior cruciate ligament reconstruction / M. T. Banovetz, N. I. Kennedy, R. F. LaPrade, L. Engebretsen [et al.] // Annals of Joint. – 2023. – Vol. 8. – P. 17. – DOI: 10.21037/aoj-22-50.

46. Chromophore based analyses of steady-state diffuse reflectance spectroscopy : current status and perspectives for clinical adoption / T. M. Bydlon, R. Nachabé, N. Ramanujam, H. J. C. M. Sterenberg [et al.] // Journal of Biophotonics. – 2015. – Vol. 8. – № 1-2. – P. 9-24. – DOI: 10.1002/jbio.201300198.

47. Comparison of MRI versus Arthroscopy in Assessment of Anterior Cruciate Ligament Injuries of The Knee Keeping Arthroscopy as Gold Standard / A. S. K. Niazi, M. U. K. Niazi, I. Zainab, H. Mumtaz [et al.] // Annals of PIMS-Shaheed Zulfiqar Ali Bhutto Medical University. – 2023. – Vol. 19. – № 2. – P. 115-119. – DOI: 10.48036/apims.v19i2.598.

48. Cruciate Ligaments in Arthritic Knees. A Histologic Study With Radiologic Correlation / A. B. Mullaji, S. V. Marawar, M. Simha, G. Jindal // Journal of Arthroplasty. – 2008. – Vol. 23. – № 4. – P. 567-572. – DOI: 10.1016/j.arth.2007.05.024.

49. Cui, S. Raman Spectroscopy and Imaging for Cancer Diagnosis / S. Cui, S. Zhang, S. Yue // Journal of Spectroscopy. – 2018. – Vol. 2018. – Article ID 8619342. – DOI: 10.1155/2018/8619342.

50. Current trends in graft choice for anterior cruciate ligament reconstruction – part I : anatomy, biomechanics, graft incorporation and fixation / A. Runer, L. Keeling, N. Wagala, H. Nugraha [et al.] // Journal of Experimental Orthopaedics. – 2023. – Vol. 10. – № 1. – P. 37. – DOI: 10.1186/s40634-023-00600-4.

51. Dawson, M. J. Muscular fatigue investigated by phosphorus nuclear magnetic resonance / M. J. Dawson, D. G. Gadian, D. R. Wilkie // *Nature*. – 1978. – Vol. 274. – № 5674. – P. 861-866. – DOI: 10.1038/274861a0.

52. Delincé, P. Anterior cruciate ligament tears : conservative or surgical treatment? A critical review of the literature / P. Delincé, D. Ghafil // *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy*. – 2012. – Vol. 20. – № 1. – P. 48-61. – DOI: 10.1007/s00167-011-1614-x.

53. Determining the precise level of lower limb amputation using photoluminescence spectroscopy / A. G. Vaganov, M. R. Kuznetsov, A. B. Artykov, A. V. Anisimov [et al.] // *Kazan Medical Journal*. – 2025. – Vol. 106. – № 1. – P. 129-138. – DOI: 10.17816/KMJ642025.

54. Diagnostic Accuracy of Non-invasive Tests Versus Arthroscopy in Anterior Cruciate Ligament (ACL) Injuries / J. Zeb, M. I. Chaudary, M. Zeb, M. Mersal [et al.] // *Cureus*. – 2024. – Vol. 16. – № 5. – P. e60925. – DOI: 10.7759/cureus.60925.

55. Discrimination of breast cancer from benign tumours using Raman spectroscopy / F. M. Lyng, D. Traynor, T. N. Q. Nguyen, A. D. Meade [et al.] // *PLOS ONE*. – 2019. – Vol. 14. – № 2. – P. e0212376. – DOI: 10.1371/journal.pone.0212376.

56. Edwards, A. The Attachments of the Fiber Bundles of the Posterior Cruciate Ligament : An Anatomic Study / A. Edwards, A. M. J. Bull, A. A. Amis // *Arthroscopy*. – 2007. – Vol. 23. – № 3. – P. 284-290. – DOI: 10.1016/j.arthro.2006.11.005.

57. Effects of knee flexion angle and loading conditions on the end-to-end distance of the posterior cruciate ligament : A comparison of the roles of the anterolateral and posteromedial bundles / J. H. Wang, Y. Kato, S. J. M. Ingham, A. Maeyama [et al.] // *American Journal of Sports Medicine*. – 2014. – Vol. 42. – № 12. – P. 2972-2978. – DOI: 10.1177/0363546514552182.

58. Epidemiology of Anterior Cruciate Ligament Tears in National Collegiate Athletic Association Athletes : 2014/15 – 2018/19 / D. R. Dewig, A. J. Boltz, R. E. Moffit, N. Rao [et al.] // *Medicine & Science in Sports & Exercise*. – 2023. – Vol. 56. – № 1. – P. 29-36. – DOI: 10.1249/MSS.0000000000003281.



59. Epidemiology of posterior cruciate ligament injuries / M. S. Schulz, K. Russe, A. Weiler, H. J. Eichhorn [et al.] // Archives of Orthopaedic and Trauma Surgery. – 2003. – Vol. 123. – № 4. – P. 186-191. – DOI: 10.1007/s00402-002-0471-y.

60. Epidemiology of surgically treated posterior cruciate ligament injuries in Scandinavia / C. Owesen, S. Sandven-Thrane, M. Lind, M. Forssblad [et al.] // Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy. – 2017. – Vol. 25. – № 8. – P. 2384-2391. – DOI: 10.1007/s00167-015-3786-2.

61. Evolving evidence in the treatment of primary and recurrent posterior cruciate ligament injuries, part 1 : anatomy, biomechanics and diagnostics / P. W. Winkler, B. Zsidai, N. N. Wagala, J. D. Hughes [et al.] // Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy. – 2021. – Vol. 29. – № 3. – P. 672-681. – DOI: 10.1007/s00167-020-06357-y.

62. Fanelli, G. C. Posterior cruciate ligament rehabilitation : how slow should we go? / G. C. Fanelli // Arthroscopy. – 2008. – Vol. 24. – № 2. – P. 234-235. – DOI: 10.1016/j.arthro.2007.09.009.

63. Fluorescence spectroscopy : A diagnostic tool for cervical intraepithelial neoplasia (CIN) / N. Ramanujam, M. F. Mitchell, A. Mahadevan, S. Thomsen [et al.] // Gynecologic Oncology. – 1994. – Vol. 52. – № 1. – P. 31-38. – DOI: 10.1006/gyno.1994.1007.

64. Giummarra, M. Efficacy of non-surgical management and functional outcomes of partial ACL tears. A systematic review of randomised trials / M. Giummarra, L. Vocale, M. King // BMC Musculoskeletal Disorders. – 2022. – Vol. 23. – № 1. – P. 332. – DOI: 10.1186/s12891-022-05278-w.

65. Grading cartilage damage with diffuse reflectance spectroscopy : Optical markers and mechanical properties / N. R. Rovnyagina, G. S. Budylin, P. V. Dyakonov, Y. M. Efremov [et al.] // Journal of Biophotonics. – 2023. – Vol. 16. – № 3. – P. e202200149. – DOI: 10.1002/jbio.202200149.

66. Identification of the Raman salivary fingerprint of Parkinson's disease through the spectroscopic–computational combinatory approach / C. Carlomagno, D. Bertazioli,

A. Gualerzi, S. Picciolini [et al.] // *Frontiers in Neuroscience*. – 2021. – Vol. 15. – Article 704963. – DOI: 10.3389/fnins.2021.704963.

67. Imaging of the anterior cruciate ligament / W. H. A. Ng, J. F. Griffith, E. H. Y. Hung, Bh. Paunipagar [et al.] // *World Journal of Orthopedics*. – 2011. – Vol. 2. – № 8. – P. 75-84. – DOI: 10.5312/wjo.v2.i8.75.

68. Incidence and long-term follow-up of isolated posterior cruciate ligament tears / T. L. Sanders, A. Pareek, I. J. Barrett, H. M. Kremers [et al.] // *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy*. – 2017. – Vol. 25. – № 10. – P. 3017-3023. – DOI: 10.1007/s00167-016-4052-y.

69. Kambhampati, S. B. S. The pushed quadriceps active test – A modification of the quadriceps active test to diagnose PCL deficiency / S. B. S. Kambhampati, B. Guthikonda // *Journal of Arthroscopic Surgery and Sports Medicine*. – 2021. – Vol. 2. – № 2. – P. 128-130. – DOI: 10.25259/JASSM\_9\_2021.

70. Kinematic analysis of the posterior cruciate ligament, part 1 : The individual and collective function of the anterolateral and posteromedial bundles / N. I. Kennedy, C. A. Wijdicks, M. T. Goldsmith, M. P. Michalski [et al.] // *American Journal of Sports Medicine*. – 2013. – Vol. 41. – № 12. – P. 2828-2838. – DOI: 10.1177/0363546513504287.

71. Label-free sensing of cells with fluorescence lifetime imaging : The quest for metabolic heterogeneity / E. A. Shirshin, M. V. Shirmanova, A. V. Gayer, M. M. Lukina [et al.] // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. – 2022. – Vol. 119. – № 9. – P. e2118241119. – DOI: 10.1073/pnas.2118241119.

72. Lamb, S. Posterior Cruciate Ligament Injury / S. Lamb, S. Koch, N. S. Nye. – Text : direct // *Common Pediatric Knee Injuries* / ed. N. S. Nye. – Cham : Springer International Publishing, 2021, pp. 133-141.

73. Local fluorescence spectroscopy and detection of malignancies using laser excitation at various wavelengths / N. N. Bulgakova, N. I. Kazachkina, V. V. Sokolov, V. V. Smirnov // *Laser Physics*. – 2006. – Vol. 16. – № 5. – P. 889-895. – DOI: 10.1134/S1054660X06050227.

74. Lubowitz, J. H. Editorial Commentary : ACL reconstruction : Single-bundle versus double-bundle / J. H. Lubowitz // *Arthroscopy*. – 2015. – Vol. 31. – № 6. – P. 1197-1198. – DOI: 10.1016/j.arthro.2015.04.078.

75. Management of combined injuries of the posterior cruciate ligament and posterolateral corner of the knee : A systematic review / S. Petrillo, P. Volpi, R. Papalia, N. Maffulli [et al.] // *British Medical Bulletin*. – 2017. – Vol. 123. – № 1. – P. 47-57. – DOI: 10.1093/bmb/ldx014.

76. McIntyre, J. Muroid degeneration of the anterior cruciate ligament mistaken for ligamentous tears / J. McIntyre, S. Moelleken, P. Tirman // *Skeletal Radiology*. – 2001. – Vol. 30. – № 6. – P. 312-315. – DOI: 10.1007/s002560100336.

77. McLean, S. G. Deconstructing the Anterior Cruciate Ligament : What We Know and Do Not Know about Function, Material Properties, and Injury Mechanics / S. G. McLean, K. F. Mallett, E. M. Arruda // *Journal of Biomechanical Engineering*. – 2015. – Vol. 137. – № 2. – P. 020906. – DOI: 10.1115/1.4029278.

78. Methods for determining the molecular composition of knee joint structures in osteoarthritis : collagen, proteoglycans and water content : a systematic review / B. Raikov, M. Lipina, K. Azarkin, Y. Goncharuk [et al.] // *Collagen and Leather*. – 2024. – Vol. 6. – № 1. – Article number 30. – DOI: 10.1186/s42825-024-00173-7.

79. Mohammad, B. A. Magnetic Resonance Imaging of Anterior Cruciate Ligament Injury / B. A. Mohammad, M. A. Gharaibeh // *Orthopedic Research and Reviews*. – 2024. – Vol. 16. – P. 233-242. – DOI: 10.2147/ORR.S450336.

80. Molecular analysis of the destruction of articular joint tissues by Raman spectroscopy / P. Casal-Beiroa, P. González, F. J. Blanco, J. Magalhães // *Expert Review of Molecular Diagnostics*. – 2020. – Vol. 20. – № 8. – P. 789-802. – DOI: 10.1080/14737159.2020.1782747.

81. Muroid cystic degeneration of the cruciate ligament / A. Kumar, D. R. Bickerstaff, J. S. Grimwood, S. K. Suvarna // *The Journal of Bone and Joint Surgery. British Volume*. – 1999. – Vol. 81-B. – № 2. – P. 304-305. – DOI: 10.1302/0301-620x.81b2.9243.

82. Muroid degeneration of the anterior cruciate ligament : Management and outcome / V. Pandey, C. P. S. Suman, S. Sharma, S. P. Rao [et al.] // Indian Journal of Orthopaedics. – 2014. – Vol. 48. – № 2. – P. 197-202. – DOI: 10.4103/0019-5413.128765.

83. Muroid degeneration of the cruciate ligaments in osteoarthritis under primary total knee arthroplasty / K. Kawaguchi, K. Michishita, T. Manabe, Y. Akasaka [et al.] // Asia-Pacific Journal of Sports Medicine, Arthroscopy, Rehabilitation and Technology. – 2018. – Vol. 12. – P. 1-4. – DOI: 10.1016/j.asmart.2017.12.002.

84. Nationwide study highlights a second peak in ACL tears for women in their early forties / M. Nicholls, T. Aspelund, T. Ingvarsson, K. Briem // Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy. – 2018. – Vol. 26. – № 2. – P. 648-654. – DOI: 10.1007/s00167-017-4807-0.

85. Near infrared spectroscopic evaluation of biochemical and crimp properties of knee joint ligaments and patellar tendon / J. Torniainen, A. Ristaniemi, J. K. Sarin, M. Prakash [et al.] // PLOS ONE. – 2022. – Vol. 17. – № 2. – P. e0263280. – DOI: 10.1371/journal.pone.0263280.

86. Non-destructive evaluation of articular cartilage defects using near-infrared (NIR) spectroscopy in osteoarthritic rat models and its direct relation to Mankin score / I. Afara, I. Prasadam, R. Crawford, Y. Xiao [et al.] // Osteoarthritis and Cartilage. – 2012. – Vol. 20. – № 11. – P. 1367-1373. – DOI: 10.1016/j.joca.2012.07.007.

87. Non-Invasive Monitoring of Human Health by Photoacoustic Spectroscopy / Y. Jin, Y. Yin, C. Li, H. Liu [et al.] // Sensors. – 2022. – Vol. 22. – № 3. – Article 1155. – DOI: 10.3390/s22031155.

88. Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy for Medical and Dental Applications : A Comprehensive Review / K. Zia, T. Siddiqui, S. Ali, I. Farooq [et al.] // European Journal of Dentistry. – 2019. – Vol. 13. – № 1. – P. 124-128. – DOI: 10.1055/s-0039-1688654.

89. Observation of tissue metabolites using nuclear magnetic resonance / D. I. Hoult, S. J. W. Busby, D. G. Gadian, G. K. Radda [et al.] // *Nature*. – 1974. – Vol. 252. – № 5481. – P. 285-287. – DOI: 10.1038/252285a0.

90. Optical biopsy of breast tissue using differential path-length spectroscopy / R. L. P. van Veen, A. Amelink, M. Menke-Pluymers, C. van der Pol [et al.] // *Physics in Medicine and Biology*. – 2005. – Vol. 50. – № 11. – P. 2573-2581. – DOI: 10.1088/0031-9155/50/11/009.

91. PCL Injuries : Evaluation and Management / J. S. Geller, J. R. Perez, C. D. Harner, M. G. Baraga. – Text : direct // *Orthopaedics and Trauma* / ed. F. S. Haddad. – Cham : Springer International Publishing, 2024. – P. 1635-1644. – DOI: 10.1007/978-3-031-30518-4\_137.

92. Petersen, W. Anatomy of the anterior cruciate ligament with regard to its two bundles / W. Petersen, T. Zantop // *Clinical Orthopaedics and Related Research*. – 2007. – № 454. – P. 35-47. – DOI: 10.1097/BLO.0b013e31802b4a59.

93. Photoacoustic Imaging in Tissue Engineering and Regenerative Medicine / B. Shrestha, F. Deluna, M. A. Anastasio, J. Y. Ye [et al.] // *Tissue Engineering Part B: Reviews*. – 2020. – Vol. 26. – № 1. – P. 79-102. – DOI: 10.1089/ten.TEB.2019.0296.

94. Pitsillides, A. Healing potential of the anterior cruciate ligament in terms of fiber continuity after a complete rupture : A systematic review / A. Pitsillides, D. Stasinopoulos, K. Giannakou // *Journal of Bodywork and Movement Therapies*. – 2021. – Vol. 28. – P. 246-254. – DOI: 10.1016/j.jbmt.2021.06.003.

95. Posterior cruciate ligament : Current concepts review / S. Pache, Z. S. Aman, M. I. Kennedy, G. Y. Nakama [et al.] // *Archives of Bone and Joint Surgery*. – 2018. – Vol. 6. – № 1. – P. 8-18. – DOI: 10.22038/abjs.2017.25851.1686.

96. Posterior cruciate ligament lesions are mainly present as combined lesions even in sports injuries / M. Schlumberger, P. Schuster, M. Eichinger, Ph. Mayer [et al.] // *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy*. – 2020. – Vol. 28. – № 7. – P. 2091-2098. – DOI: 10.1007/s00167-020-05919-4.

97. Posterior cruciate ligament tears : Functional and postoperative rehabilitation / C. M. Pierce, L. O'Brien, L. W. Griffin, R. F. LaPrade // *Knee Surgery, Sports*

Traumatology, Arthroscopy. – 2013. – Vol. 21. – № 5. – P. 1071-1084. – DOI: 10.1007/s00167-012-1970-1.

98. Predicting anterior cruciate ligament degeneration using magnetic resonance imaging : Insights from histological evaluation / S. Toyono, A. Suzuki, Y. Wanezaki [et al.] // Journal of Orthopaedic Science. – 2024. – DOI: 10.1016/j.jos.2024.04.009.

99. Primary Repair of the Anterior Cruciate Ligament : A Systematic Review / S. A. Taylor, M. M. Khair, T. R. Roberts, G. S. Difelice // Arthroscopy. – 2015. – Vol. 31. – № 11. – P. 2233-2247. – DOI: 10.1016/j.arthro.2015.05.007.

100. Quantitative analysis of human cruciate ligament insertions / C. D. Harner, G. H. Baek, T. M. Vogrin, G. J. Carlin [et al.] // Arthroscopy. – 1999. – Vol. 15. – № 7. – P. 741-749. – DOI: 10.1016/s0749-8063(99)70006-x.

101. Raman spectroscopy and its use for live cell and tissue analysis / H. Sato, M. Ishigaki, A. Taketani, B. B. Andriana // Biomedical Spectroscopy and Imaging. – 2019. – Vol. 7. – № 3-4. – P. 97-104. – DOI: 10.3233/BSI-180184.

102. Raman spectroscopy and machine learning for biomedical applications : Alzheimer's disease diagnosis based on the analysis of cerebrospinal fluid / E. Ryzhikova, N. M. Ralbovsky, V. Sikirzhytski, O. Kazakov [et al.] // Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy. – 2021. – Vol. 248. – P. 119188. – DOI: 10.1016/j.saa.2020.119188.

103. Ramírez-Elías, M. G. Raman Spectroscopy for In Vivo Medical Diagnosis / M. G. Ramírez-Elías, F. J. González. – Text : direct // Raman Spectroscopy / ed. G. S. Nascimento. – London : IntechOpen, 2018, pp. 293-312. – DOI: 10.5772/intechopen.72933.

104. Reliability of a Novel Automatic Knee Arthrometer for Measuring Knee Laxity After Anterior Cruciate Ligament Ruptures / X. Niu, H. Mai, T. Wu, Y. Jiang [et al.] // Orthopaedic Journal of Sports Medicine. – 2022. – Vol. 10. – № 2. – P. 23259671211051301. – DOI: 10.1177/23259671211051301.

105. Resonance Raman Spectra for the In Situ Identification of Bacteria Strains and Their Inactivation Mechanism / D. Dhankhar, A. Nagpal, R. Li, J. Chen [et al.] //

Applied Spectroscopy. – 2021. – Vol. 75. – № 9. – P. 1146-1154. – DOI: 10.1177/0003702821992834.

106. Sex Differences In Posterior Cruciate Ligament Injuries / R. Oganessian, M. A. Anderson, F. J. Simeone, C. Y. Chang [et al.] // Journal of Women's Sports Medicine. – 2022. – Vol. 2. – № 1. – P. 19-26. – DOI: 10.53646/jwsm.v2i1.11.

107. Shahzad, A. Fluorescence spectroscopy : An emerging excellent diagnostic tool in medical sciences / A. Shahzad, M. Edetsberger, G. Koehler // Applied Spectroscopy Reviews. – 2010. – Vol. 45. – № 1. – P. 1-11. – DOI: 10.1080/05704920903435375.

108. Shino, K. Anatomy and Biomechanics / K. Shino. – Text : direct // Essence of Anterior Cruciate Ligament. – Singapore : Springer Nature Singapore, 2023, pp. 7-17. – ISBN 978-981-99-6535-9. – DOI: 10.1007/978-981-99-6536-6\_7.

109. Shino, K. Basics in ACL Reconstruction / K. Shino. – Text : direct // Essence of Anterior Cruciate Ligament. – Singapore : Springer Nature Singapore, 2023, pp. 49-64. – ISBN 978-981-99-6535-9. – DOI: 10.1007/978-981-99-6536-6\_7.

110. Shino, K. Diagnosis of ACL Injury / K. Shino. – Text : direct // Essence of Anterior Cruciate Ligament. – Singapore : Springer Nature Singapore, 2023, pp. 25-39. – ISBN 978-981-99-6535-9. – DOI: 10.1007/978-981-99-6536-6\_7.

111. Shino, K. Rehabilitation / K. Shino. – Text : direct // Essence of Anterior Cruciate Ligament. – Singapore : Springer Nature Singapore, 2023, pp. 79-100. – ISBN 978-981-99-6535-9. – DOI: 10.1007/978-981-99-6536-6\_7.

112. Shino, K. Treatment Strategy for ACL Injury / K. Shino. – Text : direct // Essence of Anterior Cruciate Ligament. – Singapore : Springer Nature Singapore, 2023, pp. 41-47. – ISBN 978-981-99-6535-9. – DOI: 10.1007/978-981-99-6536-6\_7.

113. Singh, N. International Epidemiology of Anterior Cruciate Ligament Injuries / N. Singh // Orthopedic Research Online Journal. – 2018. – Vol. 1. – № 5. – P. 1-4. – DOI: 10.31031/OPROJ.2018.01.000525.

114. Smith, I. C. P. Magnetic resonance spectroscopy in medicine : Clinical impact / I. C. P. Smith, L. C. Stewart // Progress in Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy. – 2002. – Vol. 40. – № 1. – P. 1-34. – DOI: 10.1016/S0079-6565(01)00038-3.

115. Surgery guidance in orthopedics and dentistry [Electronic resource] / G. S. Budylin, N. R. Rovnyagina, E. E. Nikonova, P. V. Dyakonov [et al.] // 2024 International Conference Laser Optics (ICLO). – Saint Petersburg : IEEE, 2024. – P. 489. – DOI: 10.1109/ICLO59702.2024.10624286. – URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10624286/> (accessed: 27.12.2025).

116. Systematic video analysis of ACL injuries in professional male football (soccer) : injury mechanisms, situational patterns and biomechanics study on 134 consecutive cases / F. Della Villa, M. Buckthorpe, A. Grassi, A. Nabiuzzi [et al.] // British Journal of Sports Medicine. – 2020. – Vol. 54. – № 23. – P. 1423-1432. – DOI: 10.1136/bjsports-2019-101247.

117. The diagnostic accuracy of clinical tests for anterior cruciate ligament tears are comparable but the Lachman test has been previously overestimated : a systematic review and meta-analysis / P. A. Sokal, R. Norris, T. W. Maddox, R. A. Oldershaw // Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy. – 2022. – Vol. 30. – № 10. – P. 3287-3303. – DOI: 10.1007/s00167-022-06898-4.

118. The Diagnostic Value of Clinical Tests, Magnetic Resonance Imaging, and Instrumented Laxity in the Differentiation of Complete Versus Partial Anterior Cruciate Ligament Tears / D. Dejour, P. G. Ntagiopoulos, P. R. Saggin, J.-C. Panisset // Arthroscopy. – 2013. – Vol. 29. – № 3. – P. 491-499. – DOI: 10.1016/j.arthro.2012.10.013.

119. The effects of knee motion and external loading on the length of the anterior cruciate ligament (ACL) : A kinematic study / J. M. Mollis, S. Takai, D. J. Adams, S. Horibe [et al.] // Journal of Biomechanical Engineering. – 1991. – Vol. 113. – № 2. – P. 208-214. – DOI: 10.1115/1.2891236.

120. The extent of degeneration of cruciate ligament is associated with chondrogenic differentiation in patients with osteoarthritis of the knee / K. Kumagai, K. Sakai, Y. Kusayama, Y. Akamatsu [et al.] // Osteoarthritis and Cartilage. – 2012. – Vol. 20. – № 11. – P. 1258-1267. – DOI: 10.1016/j.joca.2012.07.013.

121. The Posterior Cruciate Ligament : Anatomy, Biomechanics, and Double-Bundle Reconstruction / R. F. LaPrade, E. R. Floyd, K. L. Falaas, N. J. Ebert [et al.] //



Journal of Arthroscopic Surgery and Sports Medicine. – 2021. – Vol. 2. – № 2. – P. 94-107. – DOI: 10.25259/JASSM\_3\_2021.

122. The role of ultrasonography in the diagnosis of anterior cruciate ligament injury : A systematic review and meta-analysis / J. Wang, H. Wu, F. Dong, B. Li [et al.] // European Journal of Sport Science. – 2018. – Vol. 18. – № 4. – P. 579-586. – DOI: 10.1080/17461391.2018.1436196.

123. Tibial Insertion of the Posterior Cruciate Ligament : A Sagittal Plane Analysis Using Gross, Histologic, and Radiographic Methods / C. T. Moorman, M. S. M. Zane, S. Bansai, S. J. Cina [et al.] // Arthroscopy. – 2008. – Vol. 24. – № 3. – P. 269-275. – DOI: 10.1016/j.arthro.2007.08.032.

124. Towards the use of diffuse reflectance spectroscopy for real-time in vivo detection of breast cancer during surgery / L. L. de Boer, T. M. Bydlon, F. van Duijnhoven, M.-J. T. F. D. Vranken Peeters [et al.] // Journal of Translational Medicine. – 2018. – Vol. 16. – № 1. – P. 367. – DOI: 10.1186/s12967-018-1747-5.

125. Vibrational spectroscopy fingerprinting in medicine : From molecular to clinical practice / V. Balan, C. T. Mihai, F. D. Cojocaru [et al.] // Materials. – 2019. – Vol. 12. – № 18. – Article 2884. – DOI: 10.3390/ma12182884.

126. Wang, L. V. Photoacoustic microscopy and computed tomography : From bench to bedside / L. V. Wang, L. Gao // Annual Review of Biomedical Engineering. – 2014. – Vol. 16. – P. 155-185. – DOI: 10.1146/annurev-bioeng-071813-104553.

127. Wasilczyk, C. The Value of Ultrasound Diagnostic Imaging of Anterior Crucial Ligament Tears Verified Using Experimental and Arthroscopic Investigations / C. Wasilczyk // Diagnostics. – 2024. – Vol. 14. – № 3. – Article 305. – DOI: 10.3390/diagnostics14030305.

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

### Форма для регистрации субъективной оценки коленного сустава по шкале Международного комитета по документации обследования коленного сустава (IKDC)

Ваше полное имя \_\_\_\_\_

Сегодняшняя дата: \_\_\_\_\_/\_\_\_\_\_/\_\_\_\_\_

День      месяц    год

Дата получения \_\_\_\_\_/\_\_\_\_\_/\_\_\_\_\_

травмы:

День      месяц    год

#### **СИМПТОМЫ\*:**

\*Оцените симптомы при максимальном уровне активности, при котором Вы можете функционировать без значимых симптомов, даже если Вы фактически выполняете действия на том же уровне.

**1. Каков максимальный уровень активности, при котором Вы можете функционировать, не испытывая значимой боли в коленном суставе?**

- Очень активные действия, например, прыжки или вращения, как при игре в баскетбол или футбол
- Активные действия, например, тяжелая физическая работа, катание на лыжах или игра в теннис
- Умеренная активность, например, умеренная физическая работа, бег, включая бег трусцой
- Легкая активность, например, ходьба, работа по дому или в саду
- Невозможность выполнять любые из указанных действий в связи с болью в коленном суставе

**2. Как часто Вы испытывали боль в течение последних 4 недель или со времени получения травмы?**

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Никогда	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Постоянно

**3. Если Вы испытываете боль, насколько она сильная?**

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Боли нет	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Максимально сильная боль

**4. Насколько сильным было напряжение или отечность в Вашем коленном суставе за последние 4 недели или со времени получения травмы?**

- Совсем нет
- В легкой степени
- В умеренной степени
- Очень сильное
- Крайне сильное

**5. Каков максимальный уровень активности, при котором Вы можете функционировать без значимого отека в коленном суставе?**

- Очень активные действия, например, прыжки или вращения, как при игре в баскетбол или футбол
- Активные действия, например, тяжелая физическая работа, катание на лыжах или игра в теннис

- Умеренная активность, например, умеренная физическая работа, бег, включая бег трусцой
- Легкая активность, например ходьба, работа по дому или в саду
- Невозможность выполнять любые из указанных действий в связи с отеком в коленном суставе

6. **Испытывали ли Вы ощущение «заклинивания» или защемления коленного сустава за последние 4 недели или со времени получения травмы?**

- Да       Нет

7. **Каков максимальный уровень активности, при котором Вы можете функционировать без значимого смещения коленного сустава?**

- Очень активные действия, например, прыжки или вращения, как при игре в баскетбол или футбол
- Активные действия, например, тяжелая физическая работа, катание на лыжах или игра в теннис
- Умеренная активность, например, умеренная физическая работа, бег, включая бег трусцой
- Легкая активность, например, ходьба, работа по дому или в саду
- Невозможность выполнять любые из указанных действий в связи со смещением коленного сустава

### **ЗАНЯТИЯ СПОРТОМ:**

8. **Каков максимальный уровень активности, при котором Вы можете заниматься спортом на регулярной основе?**

- Очень активные действия, например, прыжки или вращения как при игре в баскетбол или футбол
- Активные действия, такие как тяжелая физическая работа, катание на лыжах или игра в теннис
- Умеренные действия, такие как умеренная физическая работа, бег или бег трусцой
- Легкая активность, например, ходьба, работа по дому или в саду
- Невозможность выполнять любые из перечисленных действий из-за проблем с коленным суставом

9. **Как состояние Вашего коленного сустава может повлиять на способность выполнять следующие действия:**

		Совсем не трудно	Минимальная степень трудности	Средняя степень трудности	Крайне трудно	Невозможно
a.	Подъем по ступеням	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
b.	Спуск по ступеням	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
c.	Опускание на колени	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
d.	Приседание	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
e.	Сидение с поджатыми ногами	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
f.	Подъем со стула	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
g.	Бег вперед	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
h.	Прыжок с опусканием на поврежденную ногу	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
i.	Быстрая остановка и быстрое начало движения	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

### **ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ:**

5. **Как бы Вы оценили функционирование колена по шкале от 0 до 10, где 10 – это нормальное, прекрасное функционирование, а 0 – невозможность выполнять обычные действия, в том числе заниматься спортом?**

ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ ДО ПОВРЕЖДЕНИЯ КОЛЕННОГО СУСТАВА:

Невозможно выполнять повседневные действия											Без ограничений
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

ТЕКУЩЕЕ ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ КОЛЕННОГО СУСТАВА:

Невозможно выполнять повседневные действия											Без ограничений
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

**Инструкции по подсчету баллов Формы для регистрации субъективной оценки коленного сустава по шкале Международного комитета по документации обследования коленного сустава (IKDC) (форма для пациентов).**

Ответы на каждый вопрос оцениваются при помощи порядкового метода оценки, так 1 балл присваивают ответам, означающим самый низкий уровень функционирования или самый высокий уровень выраженности симптомов. Например, в пункте 1, связанном с максимальным уровнем активности без значимой боли, ответу «Невозможно выполнять любое из указанных действий в связи с проблемами с коленным суставом» присваивают 1 балл, а ответу «Очень активные действия, например, прыжки или вращения, как при игре в баскетбол или футбол» присваивают 5 баллов. В пункте 2, связанном с частотой боли в течение последних 4 недель, ответу «Постоянно» присваивают 1 балл, а ответу «Никогда» присваивают 11 баллов.

Подсчет баллов по форме субъективной оценки состояния коленного сустава IKDC выполняют путем подсчета баллов по отдельным пунктам с последующим преобразованием балльной оценки по шкале от 0 до 100. Примечание. Ответ на 10-й вопрос

«Функционирование до повреждения коленного сустава» не включен в общую балльную оценку. Этапы подсчета баллов по форме для субъективной оценки состояния коленного сустава IKDC:

Присваивают балл ответу на каждый вопрос, например, самый низкий балл присваивают наименьшему уровню функционирования или наибольшей выраженности симптомов.

Рассчитывают предварительный балл, складывая баллы ответов на все вопросы, за исключением ответа на 10-й вопрос «Функционирование до повреждения коленного сустава».

Предварительный балл преобразуют по шкале от 0 до 100

Преобразованный балл интерпретируют в зависимости от функционирования, так, более высокий балл означает более высокий уровень функционирования и более низкий уровень симптомов. Оценка в 100 баллов означает отсутствие ограничений в повседневных действиях или занятиях спортом и отсутствие симптомов.

Балльный показатель субъективной оценки коленного сустава IKDC можно рассчитать и в случае отсутствия некоторых данных при условии, что имеются ответы минимум на 90% вопросов (т. е. ответы даны минимум на 16 вопросов). Для того чтобы рассчитать предварительный балл IKDC в случае отсутствия некоторых данных, вопросам, на которые не было дано ответа, присваивают средний балл.

## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

### Шкала оценки исхода травмы и остеоартроза коленного сустава (KOOS)

Полное имя пациента не сообщается, указывается только год рождения

Текущая дата: \_\_\_\_\_ / \_\_\_\_\_ / \_\_\_\_\_ Дата рождения: \_\_\_\_\_ / \_\_\_\_\_ / \_\_\_\_\_

Имя: \_\_\_\_\_

**ИНСТРУКЦИИ:** В данном опроснике мы просим Вас высказать Ваше мнение о состоянии Вашего коленного сустава. Данная информация поможет нам отслеживать состояние Вашего коленного сустава и Вашу способность выполнять повседневные действия.

Ответьте на каждый вопрос, делая метку в соответствующем окне, отмечайте только один вариант ответа на каждый вопрос. Если Вы не уверены в том, как ответить на вопрос, дайте наиболее подходящий ответ.

#### **Симптомы**

На эти вопросы следует отвечать, учитывая симптомы со стороны коленного сустава за **прошедшую неделю**.

S1. Наблюдается ли у Вас отечность коленного сустава?

Никогда	Редко	Иногда	Часто	Всегда
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

S2. Ощущаете ли Вы хруст, слышите ли потрескивание или другой звук при движении коленом?

Никогда	Редко	Иногда	Часто	Всегда
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

S3. Ощущаете ли Вы «заклинивание» или защемление колена при движении?

Никогда	Редко	Иногда	Часто	Всегда
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

S4. Можете ли Вы полностью выпрямить ногу в колене?

Всегда	Часто	Иногда	Редко	Никогда
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

S5. Можете ли Вы полностью согнуть ногу в колене?

Всегда	Часто	Иногда	Редко	Никогда
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

### Скованность

Следующие вопросы относятся к оценке скованности Вашего коленного сустава за **прошедшую неделю**. Скованность – это ощущение ограниченности или замедленности движения коленного сустава.

S6. Насколько значительную скованность в коленном суставе Вы испытываете, просыпаясь утром?

Отсутствует	Легкая степень	Умеренная степень	Сильная степень	Крайняя степень
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

S7. Насколько тяжелую скованность сустава Вы испытываете в положении сидя, лежа или в состоянии покоя в течение дня?

Отсутствует	Легкая степень	Умеренная степень	Сильная степень	Крайняя степень
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

### Боль

P1. Насколько часто Вы испытываете боль в колене?

Никогда	Каждый месяц	Каждую неделю	Каждый день	Всегда
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Насколько сильную боль Вы испытывали в течение **прошедшей недели** при выполнении следующих действий?

P2. Кручение/поворот колена

Отсутствует	Легкая степень	Умеренная степень	Сильная степень	Крайняя степень
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

P3. Полное выпрямление колена

Отсутствует	Легкая степень	Умеренная степень	Сильная степень	Крайняя степень
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

P4. Полное сгибание колена

Отсутствует	Легкая степень	Умеренная степень	Сильная степень	Крайняя степень
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

P5. Ходьба по плоской поверхности

Отсутствует	Легкая степень	Умеренная степень	Сильная степень	Крайняя степень
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

P6. Подъем или спуск по ступеням

Отсутствует	Легкая степень	Умеренная степень	Сильная степень	Крайняя степень
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

P7. Ночью в постели

Отсутствует	Легкая степень	Умеренная степень	Сильная степень	Крайняя степень
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

P8. В положении сидя или лежа

Отсутствует	Легкая степень	Умеренная степень	Сильная степень	Крайняя степень
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

P9. В положении стоя прямо

Отсутствует	Легкая степень	Умеренная степень	Сильная степень	Крайняя степень
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

**Функции, повседневная активность**

Следующие вопросы касаются физических функций. При помощи этих вопросов мы хотим оценить Вашу способность к передвижению и самообслуживанию. Пожалуйста, оцените степень затруднения, которое Вы испытывали при выполнении каждого из перечисленных далее действий в течение **прошедшей недели** в связи с состоянием Вашего коленного сустава.



## A1. Спуск по ступеням

Отсутствует	Легкая степень	Умеренная степень	Сильная степень	Крайняя степень
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

## A2. Подъем по ступеням

Отсутствует	Легкая степень	Умеренная степень	Сильная степень	Крайняя степень
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Пожалуйста, оцените степень затруднения, которое Вы испытывали при выполнении каждого из перечисленных далее действий в течение **прошедшей недели** в связи с состоянием Вашего коленного сустава.

## A3. Подъем из положения сидя

Отсутствует	Легкая степень	Умеренная степень	Сильная степень	Крайняя степень
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

## A4. В положении стоя

Отсутствует	Легкая степень	Умеренная степень	Сильная степень	Крайняя степень
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

## A5. Наклон к полу/подъем предмета

Отсутствует	Легкая степень	Умеренная степень	Сильная степень	Крайняя степень
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

## A6. Ходьба по плоской поверхности

Отсутствует	Легкая степень	Умеренная степень	Сильная степень	Крайняя степень
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

A7. При посадке в автомобиль/высадке из автомобиля

Отсутствует	Легкая степень	Умеренная степень	Сильная степень	Крайняя степень
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

A8. Поход за покупками

Отсутствует	Легкая степень	Умеренная степень	Сильная степень	Крайняя степень
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

A9. Надевание носков/чулок

Отсутствует	Легкая степень	Умеренная степень	Сильная степень	Крайняя степень
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

A10. Подъем с кровати

Отсутствует	Легкая степень	Умеренная степень	Сильная степень	Крайняя степень
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

A11. Снятие носков/чулок

Отсутствует	Легкая степень	Умеренная степень	Сильная степень	Крайняя степень
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

A12. В положении лежа на кровати (переворот, сохранение положения колен)

Отсутствует	Легкая степень	Умеренная степень	Сильная степень	Крайняя степень
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

A13. Вход в ванну/выход из ванны

Отсутствует	Легкая степень	Умеренная степень	Сильная степень	Крайняя степень
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

A14. В положении сидя

Отсутствует	Легкая степень	Умеренная степень	Сильная степень	Крайняя степень
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

A15. Посадка на унитаз/подъем с унитаза

Отсутствует	Легкая степень	Умеренная степень	Сильная степень	Крайняя степень
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Пожалуйста, оцените степень затруднения, которое Вы испытывали при выполнении каждого из перечисленных далее действий в течение **прошедшей недели** в связи с состоянием Вашего коленного сустава.

A16. Тяжелые домашние обязанности (передвижение тяжелых коробок, отскабливание полов и т. д.)

Отсутствует	Легкая степень	Умеренная степень	Сильная степень	Крайняя степень
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

A17. Легкие домашние обязанности (приготовление пищи, вытирание пыли и т. д.)

Отсутствует	Легкая степень	Умеренная степень	Сильная степень	Крайняя степень
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

#### Действия, занятия спортом и активный отдых

Следующие вопросы касаются Вашей физической функции при более высоком уровне активности. На вопросы следует отвечать с учетом степени затруднения, которое Вы испытывали в течение **прошедшей недели** в связи с состоянием Вашего коленного сустава.

SP1. Приседания

Отсутствует	Легкая степень	Умеренная степень	Сильная степень	Крайняя степень
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

## SP2. Бег

Отсутствует	Легкая степень	Умеренная степень	Сильная степень	Крайняя степень
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

## SP3. Прыжки

Отсутствует	Легкая степень	Умеренная степень	Сильная степень	Крайняя степень
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

## SP4. Кручение/поворот поврежденного колена

Отсутствует	Легкая степень	Умеренная степень	Сильная степень	Крайняя степень
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

## SP5. Вставание на колени

Отсутствует	Легкая степень	Умеренная степень	Сильная степень	Крайняя степень
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

**Качество жизни**

Q1. Как часто Вы ощущаете проблему с коленом?

Никогда	Каждый месяц	Каждую неделю	Каждый день	Постоянно
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Q2. Меняли ли Вы свой образ жизни с тем, чтобы избежать действий, которые могут оказать негативное влияние на колено?

Совсем нет	Немного	Умеренно	Существенно	Полностью
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Q3. Насколько Вас беспокоит отсутствие уверенности в состоянии колена?

Совсем нет	Немного	Умеренно	Существенно	Крайне сильно
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Q4. В целом, насколько большие затруднения Вы испытываете в связи с состоянием Вашего колена?

Затруднения отсутствуют	Легкая степень	Умеренная степень	Сильная степень	Крайняя степень
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

### Интерпретация шкалы KOOS

Опросник KOOS включает пять разделов, имеющих отношение к пациентам: боль, симптомы, повседневная деятельность, спорт и отдых, а также качество жизни. Каждый из этих разделов оценивается отдельно по шкале Ликерта с пятью возможными вариантами ответов от 0 (отсутствие проблем) до 4 (крайне выраженные проблемы). Баллы по каждому разделу рассчитываются путем суммирования ответов на соответствующие вопросы. Полученные баллы затем преобразуются в шкалу от 0 до 100, где 0 означает крайне выраженные проблемы с коленом, а 100 – отсутствие проблем с коленом. Баллы по этой шкале представляют собой процент от максимально возможного балла, полученного респондентом. Необходимо дать ответ не менее чем на 50% вопросов.

## ПРИЛОЖЕНИЕ В

## Модифицированная шкала Лисхольма

Шкала Лисхольма	Балл
<b>Боль</b>	
• боли нет	5
• интермиттирующая боль при сильном напряжении	4
• выраженная боль при сильном напряжении	3
• выраженная боль во время, или после ходьбы на расстояние свыше 2 км	2
• выраженная боль во время, или после ходьбы на расстояние менее 2 км	1
• постоянная боль	0
<b>Нестабильность</b>	
• колено никогда не подгибается <sup>1</sup>	5
• колено редко подгибается при занятиях спортом или сильном напряжении	4
• колено часто подгибается при занятиях спортом или сильном напряжении	3
• колено периодически подгибается во время повседневных действий	2
• колено часто подгибается во время повседневных действий	1
• колено подгибается на каждом шагу	0
<b>«Заклинивание» коленного сустава</b>	
• ощущение «заклинивания» или защемления отсутствует	4
• ощущение защемления, но ощущение «заклинивания» отсутствует	3
• периодическое ощущение «заклинивания»	2
• частое ощущение «заклинивания»	1
• «заклинивания» коленного сустава в настоящий момент	0
<b>Хромота</b>	
• хромота отсутствует	2
• легкая или периодическая хромота	1
• тяжелая и постоянная хромота	0
<b>Подъем по ступеням</b>	
• при подъеме по ступеням проблемы, связанные с коленным суставом, отсутствуют	3
• подъем по ступеням слегка затруднен из-за состояния колена	2
• в связи с состоянием коленного сустава подниматься по ступеням возможно, только переставляя поочередно одну ногу за другой	1
• подъем по ступеням невозможен из-за состояния колена	0
<b>Приседания</b>	
• проблемы с приседанием отсутствуют	3
• приседание слегка затруднено из-за состояния колена	2
• невозможно присесть под углом выше 90°	1
• Приседание невозможно из-за состояния колена	0

<b>Вспомогательные средства передвижения</b>	
• никакие вспомогательные средства передвижения не используются	2
• используется трость или костыль	1
• Подъём тяжестей невозможен в связи с состоянием коленного сустава (суставов)	0

### Интерпретация шкалы Lysholm

Шкала Лисхольма для оценки состояния коленного сустава рассчитывает и оценивает общий балл от 0 до 100 на основе 8 областей: приседание, блокировка, боль, подъем по лестнице, поддержка, нестабильность и отек. Врачи используют эту специфическую для данного состояния субъективную оценку результатов для оценки прогресса пациента после операции или травмы колена. Баллы от 95 до 100 считаются исключительными, от 84 до 94 – приемлемыми, от 65 до 83 – удовлетворительными, а менее 65 – плохими.