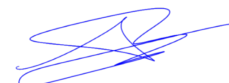


ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ ПЕРВЫЙ МОСКОВСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ МЕДИЦИНСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ
И.М. СЕЧЕНОВА МИНИСТЕРСТВА ЗДРАВООХРАНЕНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ (СЕЧЕНОВСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

На правах рукописи



Филистеев Павел Анатольевич

**Функциональная магнитно-резонансная томография (фМРТ)
в диагностике повреждений передней крестообразной связки
коленного сустава до и после пластики**

3.1.25. Лучевая диагностика

Диссертация
на соискание ученой степени
кандидата медицинских наук

Научный руководитель:

доктор медицинских наук, профессор,
академик РАН

Серова Наталья Сергеевна

Москва – 2026

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
ГЛАВА 1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ	16
1.1. Распространенность и медико-социальный аспект повреждения передней крестообразной связки коленного сустава и ее трансплантата	16
1.2. Анатомия, биомеханика и факторы риска повреждения передней крестообразной связки коленного сустава и ее трансплантата	20
1.3. Клиника и диагностика повреждения передней крестообразной связки до и после пластики	27
1.3.1. Лучевая диагностика повреждения передней крестообразной связки до и после пластики	32
1.3.2. Артроскопическая оценка повреждения передней крестообразной связки до и после пластики	49
1.4. Современный взгляд на тактику лечения и реабилитации пациентов с повреждением передней крестообразной связки до и после пластики	51
ГЛАВА 2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ	59
2.1. Общая характеристика собственного материала	59
2.2. Методы обследования здоровых добровольцев и пациентов с подозрением на повреждение передней крестообразной связки или трансплантата	64
2.2.1. Клинические методы	64
2.2.2. Методы лучевой диагностики	68
2.2.3. Артроскопическая оценка патологии	80
2.2.4. Статистическая обработка данных	81
ГЛАВА 3. РЕЗУЛЬТАТЫ СОБСТВЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ	84
3.1. Результаты функциональной магнитно-резонансной томографии коленного сустава здоровых добровольцев	84
3.2. Результаты магнитно-резонансной томографии и функциональной магнитно-резонансной томографии коленного сустава у пациентов с подозрением на повреждение передней крестообразной связки	88

3.3. Результаты магнитно-резонансной томографии и функциональной магнитно-резонансной томографии коленного сустава у пациентов с подозрением на повреждение трансплантата передней крестообразной связки	95
3.4. Результаты артроскопического оперативного вмешательства у пациентов с подозрением на повреждение передней крестообразной связки и трансплантата передней крестообразной связки.....	102
3.5. Диагностическая эффективность и прогностическая ценность магнитно-резонансной томографии и функциональной магнитно-резонансной томографии у пациентов с подозрением на повреждение передней крестообразной связки	107
3.6. Диагностическая эффективность и прогностическая ценность магнитно-резонансной томографии и функциональной магнитно-резонансной томографии у пациентов с подозрением на повреждение трансплантата передней крестообразной связки	112
ГЛАВА 4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ	117
4.1. Методика и протокол функциональной магнитно-резонансной томографии коленного сустава	117
4.2. Нормальная магнитно-резонансная анатомия и магнитно-резонансная семиотика повреждения передней крестообразной связки на основе данных функциональной магнитно-резонансной томографии.....	121
4.3. Нормальная магнитно-резонансная анатомия и магнитно-резонансная семиотика повреждения трансплантата передней крестообразной связки на основе данных функциональной магнитно-резонансной томографии.....	124
4.4. Сравнение диагностической эффективности и прогностической ценности магнитно-резонансной томографии и функциональной магнитно-резонансной томографии у пациентов с подозрением на повреждение передней крестообразной связки коленного сустава.....	128

4.5. Сравнение диагностической эффективности и прогностической ценности магнитно-резонансной томографии и функциональной магнитно-резонансной томографии у пациентов с подозрением на повреждение трансплантата передней крестообразной связки коленного сустава	132
4.6. Алгоритм лучевого обследования пациентов с подозрением на повреждение передней крестообразной связки коленного сустава и трансплантата передней крестообразной связки коленного сустава	137
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	141
ВЫВОДЫ	151
ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ	153
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	154
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	157

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования

Среди травм коленного сустава особое значение имеет повреждение связочного аппарата. Одной из самых травмируемых связок является передняя крестообразная связка (ПКС). Так, по данным исследований, на нее может приходиться до 50% всех повреждений [187]. Кроме того, на 100 000 населения ежегодно происходит 33,5 свежих разрывов ПКС [187].

ПКС отвечает за ограничение переднего смещения большеберцовой кости, а также ограничивает чрезмерный объем ее вращения. ПКС состоит из 2 пучков: переднемедиального (ПМ) и заднелатерального (ЗЛ) [143]. Функции ПМ и ЗЛ пучков в амортизации нагрузки на коленный сустав различны: ПМ пучок ПКС преимущественно лимитирует переднее смещение голени, а ЗЛ – ее ротацию. Попеременное натяжение каждого из пучков при флексии или экстензии сустава обеспечивает ПКС постоянное натяжение в каждый момент времени. Данное свойство позволяет стабилизировать коленный сустав во время нормального двигательного цикла [32].

Разрывы ПКС социально значимы в связи с тем, что часто происходят у спортсменов, молодых людей, а также у людей в более зрелой возрастной группе, тем не менее сохраняющих трудоспособность и придерживающихся высокой физической активности. Это определяет важное значение своевременной диагностики и лечения патологии крестообразных связок [32].

В своем исследовании I.M. Alardi (2023) установил, что прямым следствием несвоевременного лечения повреждения ПКС являются разрывы менисков, коллатеральных связок и суставного хряща. Так, средняя задержка в артроскопии при травме крестообразных связок на $3,69 \pm 1,07$ года приводила к разрывам медиального мениска в 80% случаев, разрывам латерального мениска – в 40% случаев, дефектам хряща – в 40% случаев [63].

Восстановление стабильности коленного сустава считается основной задачей реконструкции ПКС, так как это предотвращает прогрессирование хондромалиции и дегенеративных разрывов менисков [179]. Хотя успешность реконструкции ПКС составляет от 75% до 97% [33], оставшиеся пациенты сталкиваются с осложнениями пластики. В научной литературе существует большая неоднородность показателей повреждения трансплантата ПКС после проведенной операции. В исследовании R.W. Wright et al. (2011) разрывы трансплантата были зафиксированы в 24,4% случаев [164].

Другие исследователи настаивают на том, что повторный разрыв трансплантата происходит реже, в интервале 0,7–14% [67, 101, 204].

Для прецизионной визуализации ПКС и ее трансплантата *in vivo* необходимо прибегать к диагностической артроскопии [162]. Однако артроскопия имеет высокую стоимость и сопряжена с необходимостью микроразрезов и введения артроскопа в коленный сустав.

Одной из актуальных проблем нашего времени до и после пластики ПКС является эффективный анализ стабильности колена, связанный как с его передним смещением, так и ротацией. Ранее выявление нестабильности будет указывать на нарушение целостности связочного аппарата и сбоях в биомеханике сустава.

В связи с вышеизложенным, актуальной задачей остается разработка нового неинвазивного метода, который с высокой диагностической эффективностью позволит выявлять повреждения ПКС и трансплантата ПКС, что повлияет на индивидуальный план хирургического лечения или реабилитации пациентов.

Степень разработанности темы исследования

У пациентов с подозрением на разрыв ПКС при первоначальном обращении за медицинской помощью правильный диагноз устанавливают только у 10–15% [149, 168, 217]. Пациентам приходится обращаться к нескольким медицинским специалистам, прежде чем будет установлен точный диагноз, что задерживает реабилитацию или хирургическое лечение [149, 168, 217].

Эти статистические данные подтверждают актуальность разработки методов своевременной диагностики разрыва ПКС на основе анамнеза, клинического обследования, а также лучевой диагностики [135, 168].

Активно изучается диагностическая достоверность физикальных тестов для выявления разрыва ПКС [92, 241]. Наиболее известными тестами в мировой травматологии являются тесты переднего выдвижного ящика (ПВЯ), Лахмана и pivot shift, а также получивший популярность в последнее время клинический тест lever sign или симптом рычага [32, 236, 254]. Данные тесты демонстрируют высокую чувствительность у пациентов с застарелыми, полными разрывами ПКС [236], в то время как для пациентов с острой травмой, болезненным и опухшим коленом или при частичном разрыве ПКС чувствительность может быть значительно меньше. Так, в исследовании A. Lelli et al. (2016) для теста Лахмана она составила 42%, ПВЯ – 29%, pivot shift – 11% [236]. В таких случаях магнитно-резонансная томография (МРТ) играет ключевую роль для подтверждения диагноза разрыва ПКС.

Ведущим методом лучевой диагностики патологии связок коленного сустава на сегодняшний день является МРТ. Исходя из литературных данных, наблюдается значительная вариабельность точности МРТ в выявлении разрывов ПКС, а именно чувствительности от 63% до 100%, специфичности от 68% до 100% [242]. Это объясняется анатомическими факторами (кососагиттальный ход, двухпучковая структура ПКС) и особенностями методики проведения классического МРТ (статичная оценка морфологии передней крестообразной связки, невозможность анализа функции коленного сустава) [202].

После реконструкции ПКС МРТ выполняет важную роль для анализа целостности и биологической интеграции трансплантата, в том числе процессов лигаментизации, васкуляризации и костной инкорпорации. МРТ также позволяет верифицировать новое повреждение при повторной травме, определить неправильное положение костных каналов, артрофиброз и другие осложнения пластики [156].

Для повышения точности диагностики разрыва ПКС до и после пластики в большинстве исследований акцент делался на уменьшение толщины среза, модернизацию импульсных последовательностей (ИП), распознавание патологических паттернов магнитно-резонансного (МР) сигнала [180, 237]. В отдельных методиках исследователи продемонстрировали увеличение точности и достоверности диагностики разрыва ПКС и трансплантата за счет применения дополнительных плоскостей – косых сагиттальных и косых фронтальных [121, 152]. При всех достоинствах стандартного МРТ коленного сустава необходимо помнить о серьезном ограничении данного метода из-за его статичности, в то время как неинвазивная визуализация коленного сустава в движении может быть крайне полезна для получения важной информации о функции и биомеханике, и выработке правильной лечебной стратегии [11].

Функциональная визуализация коленного сустава в настоящее время доступна на рентгеноскопии, компьютерной томографии (КТ), ультразвуковом исследовании (УЗИ). Однако особенности расположения ПКС в центральных отделах сустава ограничивают возможности этих методов лучевой диагностики. КТ и рентгеноскопия эффективны лишь для оценки движения костей, имеют лучевую нагрузку [8, 10]. УЗИ отлично определяет суставной выпот, состояние параартикулярных тканей, мышц и связок, хуже – менисков и крестообразных связок.

Современные технические возможности МР-томографов позволяют использовать имеющиеся последовательности для проведения функциональной магнитно-резонансной томографии (фМРТ) внутренних структур коленного сустава в движении [113]. фМРТ в режиме реального времени позволяет оценить биомеханику, состояние ПКС в разные фазы двигательного цикла, визуализировать нестабильность, что невозможно при выполнении МРТ в неподвижном состоянии коленного сустава [43].

Необходимые технические параметры и протокол фМРТ коленного сустава по данным литературы не определены. Современные МР-томографы не оснащаются программным обеспечением для визуализации

опорно-двигательного аппарата в движении, а в клинической практике до сих пор существует проблема неинвазивной оценки биомеханики ПКС [114].

Исходя из вышеизложенного, актуальной задачей является разработка универсальной методики и протокола фМРТ коленного сустава в движении для оценки состояния ПКС до и после пластики, воспроизводимой на высокопольных МРТ, отличающихся по параметрам напряженности магнитного поля, ширине апертуры гентри и производителю. Также важным представляется изучение лучевой анатомии и разработка семиотики повреждений ПКС и ее трансплантата на фМРТ в движении с последующей оценкой диагностической эффективности и прогностической ценности фМРТ.

Цель и задачи исследования

Цель исследования: совершенствование методов лучевой диагностики и определение возможностей функциональной магнитно-резонансной томографии коленного сустава в диагностике повреждений передней крестообразной связки коленного сустава до и после пластики.

Задачи исследования:

1. Разработать методику и протокол исследования функциональной магнитно-резонансной томографии коленного сустава на томографах различных производителей, с апертурой гентри 60 см и 70 см, напряженностью магнитного поля 1,5 Тл и 3 Тл.
2. Определить возможности функциональной магнитно-резонансной томографии коленного сустава в оценке анатомии и биомеханики передней крестообразной связки и ее трансплантата.
3. Изучить и разработать семиотику повреждений передней крестообразной связки и ее трансплантата с помощью функциональной магнитно-резонансной томографии.

4. Определить диагностическую эффективность и прогностическую ценность функциональной магнитно-резонансной томографии в диагностике повреждений передней крестообразной связки коленного сустава до и после пластики.
5. Разработать оптимальный алгоритм лучевого обследования при подозрении на повреждение передней крестообразной связки или трансплантата передней крестообразной связки.

Научная новизна

Впервые разработана методика и протокол фМРТ коленного сустава для диагностики повреждений ПКС до и после пластики на различных типах МР-томографов (разные производители, апертуры гентри, напряженность магнитного поля).

Впервые изучена анатомия и биомеханика ПКС и ее трансплантата в движении с использованием фМРТ.

Впервые изучена и разработана МР-семиотика повреждений ПКС и ее трансплантата в движении с использованием фМРТ.

Впервые оценена диагностическая эффективность фМРТ в сравнении с МРТ при повреждении ПКС и ее трансплантата.

Впервые дана объективная оценка возможностям неинвазивной функциональной методики (фМРТ) в диагностическом алгоритме при подозрении на повреждение ПКС или ее трансплантата.

Предложен диагностический алгоритм лучевого обследования пациентов при подозрении на повреждение ПКС или трансплантата ПКС с использованием фМРТ.

Теоретическая и практическая значимость работы

В данной научно-исследовательской работе была продемонстрирована методика и протокол фМРТ коленного сустава с акцентом на визуализацию ПКС и

ее трансплантата на МР-томографах разных производителей, отличающихся по напряженности магнитного поля (1,5 Тл и 3 Тл), ширине апертуры гентри (60 см и 70 см). Изучена и описана анатомия, биомеханика интактной ПКС в движении, а также семиотика повреждений ПКС на фМРТ до и после пластики. Определена диагностическая эффективность фМРТ в определении повреждений ПКС и ее трансплантата. На основе данных фМРТ выделены дополнительные признаки несостоятельности ПКС и трансплантата, уточняющие степень разрыва и применяемые при выборе оптимального метода лечения. Предложено использование фМРТ в алгоритме лучевой диагностики пациентов с подозрением на повреждение ПКС или трансплантата ПКС коленного сустава для повышения точности диагностики.

Методология и методы исследования

В рамках данной научно-исследовательской работы были соблюдены этические нормы, принципы и постулаты доказательной медицины. Методология диссертационной работы включала в себя установление критериев отбора, формирования репрезентативности выборки с учетом анализа ее характеристик и объема, планирования дизайна исследования, выбор оптимальных инструментов для статистического анализа полученных результатов. При проведении диссертационной работы применялись современные диагностические методы, с помощью которых проводились обследования всем здоровым добровольцам и пациентам.

Протокол проведения научного исследования был одобрен Локальным этическим комитетом ФГАОУ ВО Первый МГМУ имени И.М. Сеченова Минздрава России (Сеченовский Университет) №22-25 от 30.10.2025 г.

Положения, выносимые на защиту

1. Методика фМРТ коленного сустава позволяет визуализировать ПКС и ее трансплантат в движении и может быть выполнена на томографах разных производителей с напряженностью магнитного поля 1,5 Тл или 3 Тл и апертурой гентри 60 см или 70 см.
2. Разработанные на фМРТ дополнительные признаки повреждения ПКС до и после пластики повышают достоверность диагностики, диагностическое согласие с артроскопией и делают фМРТ более качественным методом-классификатором степени разрыва ПКС и ее трансплантата по сравнению с МРТ.
3. фМРТ превосходит стандартную МРТ коленного сустава в диагностической эффективности при выявлении повреждения ПКС и трансплантата ПКС.
4. Включение фМРТ в алгоритм лучевой диагностики пациентов с повреждением ПКС до и после пластики способствует уменьшению ошибочных диагнозов частичного разрыва (в сторону нормы либо полного разрыва по сравнению со стандартной МРТ), что позволяет повысить точность и выбрать оптимальную тактику лечения пациентов

Соответствие диссертации паспорту научной специальности

Научные положения диссертации соответствуют паспорту научной специальности 3.1.25. Лучевая диагностика, пунктам 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 10, 14 направлений исследований.

Степень достоверности и апробация результатов

Результаты исследования подтверждены достаточным количеством пациентов, включенных в исследование, использованными методами диагностики, а также тщательным и качественным анализом данных с применением актуальных программ и методов статистической обработки. Полученные данные наглядно

представлены в таблицах, графиках и схемах, что позволяет понять основные положения работы. Полученные данные соответствуют современной проблематике выбранной темы и согласуются с результатами других исследований.

Результаты исследования, изложенные в диссертации, были представлены и обсуждены на следующих конференциях:

- научно-практической конференции «Артроклуб-25», (г. Сочи, 7–8 февраля 2025);
- XIX Всероссийском национальном конгрессе лучевых диагностов и терапевтов «Радиология-2025» (г. Москва, 27–29 мая 2025).

Апробация диссертационной работы проведена на заседании кафедры лучевой диагностики и лучевой терапии Института клинической медицины имени Н.В. Склифосовского ФГАОУ ВО Первый МГМУ имени И.М. Сеченова Минздрава России (Сеченовский Университет) (г. Москва, 02.02.2026 г., протокол № 9).

Внедрение результатов исследования в практику

Основные научные положения, выводы и рекомендации диссертационного исследования внедрены в лечебный процесс отделения лучевой диагностики № 2 Университетской клинической больницы № 1 ФГАОУ ВО Первый МГМУ имени И.М. Сеченова Минздрава России (Сеченовский Университет), отделений рентгенодиагностики с МРТ-кабинетом и травматологии и ортопедии АНО ЦКБ Святителя Алексия.

Основные научные положения, выводы и рекомендации диссертационной работы внедрены в учебный процесс кафедры лучевой диагностики и лучевой терапии Института клинической медицины имени Н.В. Склифосовского ФГАОУ ВО Первый МГМУ имени И.М. Сеченова Минздрава России (Сеченовский Университет).

Личный вклад автора

Все результаты, представленные в диссертационной работе, самостоятельно получены автором в отделении рентгенодиагностики с МРТ-кабинетом АНО ЦКБ Святителя Алексия, отделении лучевой диагностики № 2 Университетской клинической больницы № 1 Сеченовского Университета, отделении рентгеновской диагностики и томографии ФГБУ «Центральная клиническая больница с поликлиникой» Управления делами Президента РФ, отделении рентгеновской диагностики и томографии ГБУЗ «ГКБ им. М.П. Кончаловского ДЗМ».

Автор принимал непосредственное участие в планировании и проведении лучевого обследования всех 130 человек, включенных в исследование: 32 здоровых добровольцев, 60 пациентов с подозрением на повреждение ПКС, 38 пациентов с подозрением на повреждение трансплантата ПКС.

Автором разработана и внедрена методика и протокол исследования фМРТ коленного сустава на МР-томографах фирм производителей General Electric (США), Siemens (Германия), Philips (Нидерланды) с апертурой гентри 60 см или 70 см и напряженностью магнитного поля 1,5 Тл и 3 Тл.

Автор лично проводил анализ и сопоставление результатов, полученных при МРТ, фМРТ и артроскопии. Автором была определена диагностическая эффективность, прогностическая ценность, достоверность и диагностическое согласие с артроскопией каждого из методов исследования с использованием программ для статистической обработки данных.

Согласно полученным результатам исследования автором был предложен усовершенствованный клинико-диагностический алгоритм обследования пациентов с использованием возможностей фМРТ при подозрении на повреждение ПКС до и после пластики. Автором изучена и описана нормальная МР-анатомия и биомеханика ПКС и трансплантата в движении, дополнена МР-семиотика повреждения ПКС до и после пластики в движении.

Публикации по теме диссертации

По результатам исследования автором опубликовано 4 работы, в том числе 1 научная статья в журнале, включенном в Перечень Сеченовского Университета / Перечень ВАК при Минобрнауки России, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук; 2 статьи в издании, индексируемом в международной базе Scopus; 1 патент.

Структура и объем диссертации

Диссертация изложена на 187 страницах компьютерного текста, включает введение, обзор литературы, главу, посвященную материалам и методам исследования, главу, посвященную результатам собственных исследований, главу, посвященную обсуждению полученных результатов, заключение, выводы, практические рекомендации, список сокращений и условных обозначений, список литературы. Диссертация содержит 19 таблиц и 43 рисунка. Список литературы состоит из 274 научных публикаций, в том числе 45 отечественных и 229 зарубежных источников.

ГЛАВА 1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

1.1. Распространенность и медико-социальный аспект повреждения передней крестообразной связки коленного сустава и ее трансплантата

Разрыв ПКС занимает лидирующее положение среди травматических повреждений коленного сустава. На долю ПКС приходится до половины всех разрывов связок коленного сустава. Каждый год в мире случается до 200 000 травм с разрывом ПКС, а на каждые 100 000 населения ежегодно приходится 29–38 свежих повреждений ПКС [26, 187].

Наиболее подвержены разрыву ПКС молодые люди (15–40 лет), занимающиеся профессиональным или любительским спортом, предполагающим резкие остановки, прыжки и смену направления (футбол, баскетбол, лыжи, волейбол), поэтому точная диагностика и своевременное лечение данной патологии имеет социальную значимость [17, 34, 64, 84].

Травма ПКС коленного сустава ухудшает качество жизни пациентов в интервале от 20 до 35 лет после произошедшего разрыва, вне зависимости от выбранной стратегии хирургического лечения (пластика ПКС сразу после травмы или поздняя реконструкция) по сравнению с консервативным лечением [176]. Повреждение ПКС приводит к нестабильности в коленном суставе, что, во-первых, значительно повышает риск повторной травматизации с вторичным повреждением других связок и менисков, а, во-вторых, непосредственно сопряжено с преждевременным разрушением суставного хряща и ранними дегенеративными процессами в суставе. Это подтверждается данными многочисленных исследований.

Так, W. Nebelung, H. Wuschech (2005) показали повышенный риск развития повреждений хряща у спортсменов высокого уровня с полной клинической нестабильностью в коленном суставе в течение 20 лет [186]. M. Sherman et al. (1988) [48] и P. Neyret et al. (1993) [195] сообщили, что хроническая нестабильность коленного сустава приводит к дегенерации хряща. P. Neuman et al. (2008)

в когортном исследовании обнаружили остеоартроз (ОА) у 51% мужчин и 41% женщин с травмой ПКС через 12–14 лет [203]. По статистике от 50% до 90% разрывов ПКС приводит к посттравматическому ОА коленного сустава [179].

После повреждения ПКС, III или IV стадия ОА по рентгенологической классификации Kellgren–Lawrence встречается приблизительно в 5 раз чаще, чем в другом колене без признаков повреждения ПКС [66]. В отличие от идиопатического ОА, посттравматический ОА имеет так называемую «стартовую точку» или другими словами четко обозначенную дату травмы, что делает возможным влиять на патогенез развития ОА, проводя своевременную диагностику и лечение повреждений внутренних структур коленного сустава [130]. Исследования показали, что повреждения ПКС являются одной из самых тяжелых травм среди футболистов всех уровней и лиг с длительным сроком реабилитации и большим количеством повторных повреждений [153]. Разрывы ПКС чаще всего происходят в соревновательных играх. При этом срок реабилитации составляет в среднем 170–200 дней, а количество повторных повреждений достигает 18–25% при прямом ударе, а при бесконтактном механизме первичного повреждения, который встречается все чаще, может достигать 40% [45, 69]. Через пять лет после травмы ПКС только 40% элитных европейских взрослых футболистов продолжают играть на прежнем уровне [211]. Травма ПКС также негативно влияет на продолжительность карьеры профессиональных футболистов.

Существует отчетливая гендерная предрасположенность риска разрыва ПКС у атлетов: женщины травмируются в 4,5 раза чаще, чем мужчины [232]. Причем в отличие от мужчин, разрывы у женщин-спортсменов происходят в более молодом возрасте и в поддерживающей, а не бьющей ноге. Также у женщин превалирует бесконтактный механизм травмы по сравнению с контактным у мужчин [122].

За последние годы увеличилась частота повреждений ПКС у детей. Авторы, исследовавшие в течение 20 лет реконструкцию ПКС в возрастной группе от 3 до 20 лет, сообщили об увеличении числа реконструкций с 17,6 на 100 000 населения в 1990 году до 50,9 реконструкций на 100 000 населения в 2009 году.

Пиковый возраст для пластики ПКС составил 17 лет, а количество прооперированных девочек-подростков было на 15% выше, чем мальчиков [46].

Подросток, у которого вовремя восстановлена стабильность биомеханики в колене, может вести более активный образ жизни и имеет больше шансов вернуться в спорт. В систематическом обзоре K.L. Dunn et al. (2016) было показано, что при своевременной операции по пластике ПКС 92% подростков в возрасте от 11 до 16 лет возвращались к спорту, при выборе консервативной тактики – только 43,75% [111]. Кинезиобофия из-за ощущения, что колено прогибается в сторону, сопутствующие разрывы менисков и юношеский ОА могут привести к завершению спортивной карьеры и формированию нездорового образа жизни. В метаанализе D.E. Ramski et al. (2014) показали, что реконструкция ПКС сразу после ее разрыва, не дожидаясь закрытия зон роста в костях, привела к повышению показателей шкалы оценки функционального статуса колена (The Pediatric International Knee Documentation Committee) и восстановления прежнего уровня активности [72].

Очень важную роль играет качество жизни пациентов после травмы ПКС в зависимости от выбранной тактики лечения. В исследовании R.C. Mather 3rd et al. (2013) своевременная диагностика и пластика ПКС в краткосрочной и среднесрочной перспективе обходилась дешевле (уменьшение стоимости на \$4,503) и была более эффективной с показателем The Quality-Adjusted Life Year (QALY) около 0,18 по сравнению с консервативной тактикой лечения. В долгосрочной перспективе эта разница возрастала до \$50,417 в денежном эквиваленте, обеспечивая при этом дополнительный прирост QALY на 0,72 по сравнению с реабилитацией [220].

В исследовании I.M. Alardi (2023) установили, что прямым следствием несвоевременного лечения повреждения ПКС являются разрывы менисков, коллатеральных связок и суставного хряща. Так, средняя задержка в артроскопии при травме крестообразных связок на $3,69 \pm 1,07$ года приводила к разрывам медиального мениска в 80% случаев, разрывам латерального мениска в 40% случаев, дефектам хряща – в 40% случаев [63].

Целью пластики ПКС является восстановление стабильности коленного сустава, при этом успешность реконструкции ПКС составляет от 75% до 97% [16, 33]. Своевременная точная диагностика и лечение осложнений пластики ПКС (передняя боль в колене, артрофиброз, нестабильность, формирование ганглионарных кист, повторные разрывы) крайне актуальна для успешной реабилитации пациента и восстановления его физической активности [7].

Истинная частота повторной травматизации после пластики ПКС сильно варьирует и может достигать 24,4% [164]. В то же время, в большинстве исследований сообщалось о частоте повреждения трансплантата ПКС в диапазоне от 0,7% до 14% [142, 143, 250]. В нескольких систематических обзорах, проведенных К.Р. Spindler et al. (2004) [67], Р.В. Lewis et al. (2008) [233] и R.W. Wright et al. (2012) [192], сообщалось о частоте повреждения 3,6%, 4% и 5,8% соответственно. Разрыв трансплантата у молодых спортсменов с реконструкцией ПКС встречается примерно у 7% [214].

Исследование, проведенное в Питтсбургском университете, показало, что после однопучковой реконструкции ПКС наиболее распространенным типом разрыва, наблюдаемым во время ревизионной операции, является проксимальный разрыв, за которым следует разрыв средней части [132].

В систематическом обзоре L. Troyer et al. (2024) на основе скрининга 712 исследований (13 из которых соответствовало критериями включения) проанализировали роль социальных факторов в исходе пластики ПКС и вероятность повторного разрыва. В исследованиях была изучена корреляция между расой, доходом, местоположением, образованием и страховкой, и результатами пластики ПКС. Риск ревизии трансплантата ПКС для чернокожих пациентов по сравнению с европеоидами варьировался от 0,23 до 0,78, для латиноамериканцев – от 0,7 до 0,83. Было обнаружено, что у пациентов, проживающих в городе, результаты операции были лучше, чем в сельской местности (среднее значение индекса International Knee Documentation Committee (IKDC) для города 85,3 и 81,87 для села). Более низкий социально-экономический статус коррелировал со снижением послеоперационных функциональных баллов

(шкала Knee Injury and Osteoarthritis Outcome Score, опросник IKDC). Таким образом, результаты пластики ПКС были хуже для белой расы, сельских жителей и низкого социально-экономического статуса, что выражалось в более высокой частоте повторных операций и сниженных функциональных показателях в период восстановления и реабилитации [248].

1.2. Анатомия, биомеханика и факторы риска повреждения передней крестообразной связки коленного сустава и ее трансплантата

ПКС отвечает за ограничение переднего смещения большеберцовой кости, а также ограничивает чрезмерный объем ее вращения. ПКС состоит из 2 пучков: ПМ и ЗЛ. Компоненты пучков ПКС названы по месту своего прикрепления к большеберцовой кости [143]. Оба пучка начинаются на задне-внутренней стороне наружного мыщелка бедренной кости и прикрепляются чуть впереди от межмыщелкового возвышения большеберцовой кости [39, 159]. Широкая точка прикрепления ПКС на поверхности большеберцовой кости обеспечивает отсутствие физиологического воздействия на межмыщелковую вырезку бедра при полном разгибании [143]. Планирование места для трансплантата ПКС должно удовлетворять этим базовым анатомическим принципам.

Средняя длина ПМ пучка ПКС составляет 33 мм, для ЗЛ пучка она составляет 18 мм [65]. Средняя толщина ПКС у трупов варьировала от 7 до 17 мм, со средним значением 11 мм. Средняя площадь поперечного сечения ПКС составляет 36 мм² для женщин и 47 мм² для мужчин [96]. ПКС состоит из плотно организованной фиброзной соединительной ткани, представленной коллагеном I типа [143]. Диссекции, проведенные J.R. Giuliani et al. (2009), продемонстрировали, что первичная васкуляризация ПКС осуществляется из средней геникулярной артерии, с дополнительным кровоснабжением из нижнемедиальной и нижнелатеральной геникулярных артерий [143]. Также по ходу связки находятся несколько типов механорецепторов: тельца Руффини, тельца Паччини, органеллы типа Гольджи и свободные нервные окончания [250].

Нагрузка, транслируемая на пучки ПКС, варьируется в зависимости от степени сгибания коленного сустава. М.Т. Gabriel et al. (2004) провели исследование на 10 трупных коленях, где воспроизвели *in situ* переднюю и комбинированную ротационную нагрузку на большеберцовую кость, идентичную таковой при натяжении ПКС. Наибольшее натяжение ПМ пучка происходило при углах сгибания в 60° и 90°. Наибольшее напряжение ЗЛ пучка наблюдалось при полном разгибании. При 15° сгибания не было статистической разницы в натяжении между двумя пучками. При больших углах сгибания ПМ пучок имел значительно более высокое натяжение и был под нагрузкой, по сравнению с ЗЛ пучком [107].

Другое кадаверное исследование установило, что волокна ЗЛ пучка подвержены большему натяжению в ответ на переднее смещение большеберцовой кости, тогда как натяжение и локальные силы в ПМ пучке оставались относительно стабильными в зависимости от угла сгибания и переднего смещения большеберцовой кости [158].

Локальное натяжение в ЗЛ пучке коррелирует с натяжением всей ПКС под разными углами сгибания, что делает необходимым производить реконструкцию ПКС максимально анатомично, в большей степени уделяя внимание ЗЛ пучку. Поскольку большинство разрывов ПКС происходит при полностью разогнутом колене, ЗЛ пучок считается более важным для общей биомеханической стабильности коленного сустава. При разгибании натяжение и сопротивление переднему смещению или скручиванию наблюдается именно в ЗЛ пучке [94, 158].

Исходя из вышеизложенного, можно сделать вывод, что ПМ и ЗЛ пучки ПКС самостоятельно и по-разному участвуют в амортизации нагрузки на коленный сустав. Во время флексии и экстензии колена пучки взаимно дополняют функцию друг друга, благодаря чему ПКС находится в постоянном натяжении в каждую фазу движения сустава. Оба пучка ПКС предотвращают избыточную переднюю трансляцию большеберцовой кости при возврате сустава в положение разгибания [32].

Пластика ПКС, моделирующая анатомию и функцию только ПМ пучка, может не обеспечивать полного восстановления функции и стабильности колена, так как сопровождается восстановлением сопротивления к переднему смещению большеберцовой кости, но не к сложным вращательным движениям и вальгусной ротации. Из-за того, что ЗЛ пучок обеспечивает значительную часть нагрузки при полном разгибании и небольшом сгибании (до 15°), особенно в ответ на вращательную силу, а ПМ пучок несет большую часть нагрузки при сгибании колена более 30° , хирургическая техника должна восстанавливать работу обоих пучков [9].

Факторы риска повреждения ПКС подразделяются на внутренние и внешние [269]. Внешние факторы могут включать уровень и тип физической активности человека, тип игровой поверхности у спортсменов и условия окружающей среды. К внутренним факторам относятся пол, гормональный профиль, генетика, нервно-мышечные и когнитивные функции, анатомические особенности (например, костная геометрия коленного сустава, состояние оси нижних конечностей, индекс массы тела), анамнез травм колена или нижней конечности в целом. Неблагоприятным для разрыва ПКС являются такие особенности анатомии как уменьшение размера межмыщелковой вырезки бедренной кости, стеноз или импинджемент межмыщелковой вырезки, гипоплазия ПКС, гипермобильность в суставе, увеличение угла наклона плато большеберцовой кости и другие [213].

Сужение межмыщелковой вырезки достоверно увеличивает частоту разрывов ПКС [102, 223]. Индекс ширины межмыщелковой вырезки, используемый для этого, представляет собой соотношение ширины межмыщелковой вырезки к ширине дистальных отделов бедренной кости на уровне вырезки надколенника. Нормальное значение индекса для людей, не подвергшихся травме ПКС, составило 0,2338, для повреждений ПКС – 0,2248, для билатерального повреждения ПКС – 0,1961 [223]. При этом размер межмыщелковой вырезки бедра не отличался у мужчин и женщин с травмой ПКС [96].

В исследовании 895 курсантов Военной академии США, находившихся под наблюдением более 4 лет, было обнаружено, что уменьшение ширины вырезки бедренной кости является значимым фактором риска травм ПКС у мужчин и женщин [154]. В другом исследовании было обнаружено, что ширина вырезки коррелирует с толщиной ПКС и задней крестообразной связки (ЗКС), и утверждалось, что именно толщина ПКС, а не размер вырезки бедренной кости, является важным фактором риска ее повреждения [219].

В нескольких исследованиях была продемонстрирована роль гипермобильности суставов в общем и коленного сустава, в частности, как самостоятельных факторов риска повреждения ПКС [141]. Было выявлено, что женщины имеют большую гиперэкстензию и нестабильность коленных суставов, чем мужчины, что ассоциировалось с повышенным риском разрыва ПКС [247].

Другие авторы нашли связь повышенного риска травматизации ПКС с увеличенной подтаранной пронацией сустава и низким положением ладьевидной кости [178], а также повышенной эластичностью илиотибиального тракта [131].

Костная геометрия суставных поверхностей мыщелков большеберцовой кости играет важную роль в распределении нагрузки на сустав, влияя на риск травм. Например, увеличение градиента наклона плато большеберцовой кости кзади и книзу, в сочетании с уменьшением глубины плато медиального мыщелка большеберцовой кости, приводит к повышенному риску повреждения ПКС [218]. Исследования на подростках и взрослых подтверждают корреляцию между уровнем наклона кзади и книзу медиального и латерального плато большеберцовой кости и риском разрыва ПКС [47, 161, 251].

В исследовании R. Hudek et al. (2011) была показана также связь между формой мениска коленного сустава и риском разрыва ПКС [166].

Таким образом, анатомические особенности строения мыщелков большеберцовой кости, в частности геометрия и углы наклона суставных поверхностей, непосредственно влияют на риск травмы ПКС и должны учитываться при прогнозировании нейромышечных тренировок у спортсменов

для предотвращения разрыва ПКС, при планировании операции и дальнейшей реабилитации.

В нескольких исследованиях был изучен риск травмы ПКС в зависимости от особенностей нейромышечного контроля. У ранее получивших травму ПКС баскетболистов и волейболистов во время выполнения теста на прыжок с приземлением наблюдалось увеличение абдукции коленного сустава, большая сила опорной реакции и более короткое время опоры по сравнению теми, кто не был травмирован. Также они имели отличающуюся осанку и биомеханику приземления [82]. В.Т. Zazulak et al. (2007) показали, что показатели стабильности корпуса и активной проприоцепции были связаны с вероятностью травмы ПКС. Для проверки реакции осевой мускулатуры и точности репозиции у студентов-спортсменов оценивали смещение торса после приложения внезапной силы к корпусу и при повороте в сторону. Авторы сообщили, что отклонение туловища при возврате в исходную позицию была больше у спортсменов с травмой ПКС ($n = 6$), чем без травмы [246].

У женщин среди факторов риска разрыва ПКС рассматриваются более слабые мышцы-сгибатели бедра (полусухожильная, полуперепончатая, бицепс) по сравнению с разгибателями – четырехглавой мышцей бедра, которая преимущественно задействована у женщин при торможении. Использование квадрицепса бедра при замедлении тела и остановке приводит к аномально повышенной нагрузке на ПКС, поскольку мышцы-разгибатели менее эффективны в предотвращении переднего смещения большеберцовой кости [234]. Биомеханика приземления у женщин также способствует увеличению риска травмы ПКС из-за увеличения вальгусного угла и разгибания колена. С использованием видеорегистрации было установлено, что спортсменки с большей вероятностью придают коленям увеличенный вальгусный угол при резком изменении направления движения, что увеличивает нагрузку на ПКС [249].

Женские гормоны могут влиять на координацию, особенно в предовуляторную фазу менструального цикла. Было отмечено, что женщины, принимавшие оральные контрацептивы, травмировались реже. Также отмечено,

что выработка коллагена (ген *COL5A1*) связана с меньшим риском травм у женщин [213].

Высокий индекс массы тела является независимым фактором риска повреждения ПКС для женщин и мужчин [96].

Большой интерес представляет собой изучение синергетического эффекта комбинации факторов риска на повреждение ПКС [212, 218]. В проспективном когортном исследовании J.M. Uhorchak et al. (2003) установили, что относительный риск повреждения ПКС при сочетании уменьшенной ширины вырезки бедренной кости, повышенного индекса массы тела и повышенных показателей гипермобильности коленного сустава был в 21,3 раза выше, чем в контрольной группе, в то время как относительный риск каждого фактора, рассматриваемого отдельно, составлял 3,8, 2,0 и 2,6 соответственно. Модели, предсказывающие травму ПКС, были разными для мужчин и женщин [212].

ПКС представляет собой сложную лентовидную структуру, которая примерно в 3,5 раза толще в местах прикрепления к большеберцовой и бедренной костям, чем в средней точке. Соответственно, ее анатомию невозможно полностью воссоздать с помощью цилиндрического трансплантата [238]. Исходя из этого, анатомическая пластика подразумевает расположение каналов в точках контакта нативной ПКС с костями [207].

Современные методы реконструкции ПКС ссылаются на анатомические исследования, которые идентифицировали «прямые и непрямые волокна» ПКС. «Прямые волокна» несут 85–95% нагрузки и обеспечивают основное сопротивление как передней большеберцовой трансляции, так и внутренней ротации/смещению оси вращения [238]. На бедренной кости эти волокна располагаются по линии, расположенной сразу за межмышечковым гребнем, и составляют ту часть ПКС, которую хирурги должны стремиться восстановить.

Размещение трансплантата непосредственно позади межмышечкового гребня создает ряд вариантов размещения от ПМ пучка до центрального положения и, наконец, до ЗЛ пучка [91]. Нативная область контакта ПКС на большеберцовой кости значительно больше, чем трансплантата ПКС, и, таким образом, он может

быть размещен в нескольких «анатомических» местах. Размещение большеберцового туннеля в самой передней части нативной области контакта не вызывает импинджмента и при этом обеспечивает более горизонтальный ход волокон [116].

Анатомия и биомеханика трансплантата ПКС, его стабильность и функциональность, в отличие от нативной связки, непосредственно зависят от вида выбранного трансплантата, артроскопической техники, эффективности процессов его лигаментизации и остеоинтеграции. Ключевыми факторами, существенно влияющими на функциональный результат, являются: индивидуальный выбор материала трансплантата, анатомическое расположение костного тоннеля, адекватное (пред)натяжение трансплантата, анатомическая фиксация трансплантата, достаточная начальная прочность фиксации трансплантата [83].

Обзор литературы по биомеханическим аспектам реконструкции ПКС позволяет сделать вывод, что все аутологичные трансплантаты, а также методы фиксации и фиксирующие материалы, предлагаемые и используемые в настоящее время в хирургии ПКС, обеспечивают достаточную начальную прочность фиксации в раннем послеоперационном периоде [133]. Кроме того, большинство исследований не демонстрирует преимуществ двухпучковой реконструкции ПКС по сравнению с однопучковой в попытке скопировать нативную ПКС и восстановить функцию ЗЛ пучка и ротационную стабильность [6].

Факторы риска повторного повреждения трансплантата ПКС, включают молодой возраст (< 25 лет), высокий уровень активности, высокорисковые виды спорта, связанные с резкими движениями и поворотами (например, футбол), использование для пластики ауто трансплантата из сухожилий подколенных сгибателей, неправильное расположение костных тоннелей, повторное повреждение в период лигаментизации (особенно через 4–8 месяцев после реконструкции) [99, 148]. Кроме того, группа MARS по мультицентровому исследованию реконструкции ПКС с участием 460 пациентов, прошедших ревизию трансплантата ПКС, классифицировала все случаи его несостоятельности как травматические (32%), технические (24%), биологические (7%), комбинированные

(37%), инфекционные (< 1%) [104]. По другим данным, повреждения трансплантата ПКС в первую очередь (вплоть до 70%) вызваны техническими ошибками операции [142].

1.3. Клиника и диагностика повреждения передней крестообразной связки до и после пластики

Разрывы ПКС составляют лишь 4% всех заболеваний коленного сустава в учреждениях первичной медико-санитарной помощи и 15% в учреждениях специализированной медицинской помощи, а их эффективное выявление в клинической практике часто является сложной задачей [168, 264]. Данные показывают, что только у 10–15% пациентов с разрывом ПКС правильно устанавливается диагноз при первоначальном обращении [149, 168]. Пациентам приходится обращаться к нескольким медицинским специалистам, прежде чем будет установлен точный диагноз, что задерживает реабилитацию или хирургическое лечение [149, 168]. Эти статистические данные подтверждают необходимость постановки клинического диагноза разрыва ПКС на основе анамнеза и физикального обследования, а также с использованием методов лучевой диагностики [135].

Для разрыва ПКС обычно не требуется прямого воздействия, бесконтактные травмы встречаются все чаще, особенно у спортсменов. Это типичная травма во многих видах спорта, когда происходит смена направления движения, удар при приземлении или падении, быстрое кинетическое торможение, особенно в сочетании с подсечками, поворотами или прыжками. При резком внутреннем повороте большеберцовой кости нога смещается кпереди, что и приводит к разрыву связки [19, 105, 254]. Реже причиной травмы становится прямой удар по голени или бедру. Наиболее распространенным контактным механизмом повреждения ПКС является травма типа «отсечение», получаемая в футболе [234]. Колено согнуто, и при постановке стопы к колену прикладывается вальгусная сила. Повреждения по типу переразгибания с варусной деформацией или без нее также могут привести

к разрыву ПКС. Механизмы повреждения одинаковы для частичного и полного разрыва. ПМ пучок ПКС чаще повреждается при частичном разрыве ПКС [105].

Непосредственно в момент травмы пострадавший чувствует резкую боль. Также он может услышать характерный треск или щелчок. В течение первых суток нарастает отек. В полости сустава скапливается большое количество крови (гемартроз), нервные окончания повреждаются, из-за чего опираться на больную ногу невозможно [105]. После окончания острого периода сильных болей обычно не наблюдается. Пациенты испытывают дискомфорт из-за нестабильности сустава. Возможно ощущение, что элементы колена сместились относительно друг друга и находятся в нефизиологичном положении. Неприятные симптомы нарастают во время физической активности, при вращательных или резких движениях, а также при занятиях спортом [22, 254].

Активно изучается диагностическая достоверность физикальных тестов для выявления разрыва ПКС [92, 241]. К трем наиболее изученным и всемирно признанным клиническим тестам следует отнести тест ПВЯ, тест Лахмана и pivot shift тест (тест поворотного сдвига) [22, 254].

При изолированном повреждении ПКС и для подтверждения хронической передней нестабильности коленного сустава наиболее информативен тест поворотного сдвига (pivot shift) [268]. Для проведения теста врач-травматолог поднимает стопу пациента, лежащего на спине, и создает одномоментную внутреннюю ротацию и абдукцию голени исследуемой конечности. В случае разрыва ПКС латеральный мышцелок большеберцовой кости смещается кпереди по типу подвывиха. Тест считается положительным, если при медленном сгибании коленного сустава на уровне 20–30° отчетливо фиксируется смещение мышцелка кзади. В зависимости от степени смещения можно предполагать частичный или полный разрыв ПКС, однако у 80% пациентов с частичным разрывом ПКС тест поворотного сдвига будет отрицательным [170]. Патомеханика теста заключается в смещении илиотибиального тракта кзади от латерального надмышцелка бедренной кости при сгибании, что создает условия для антагонизма к переднему смещению большеберцовой кости кпереди [252].

Наиболее известным физикальным приемом для диагностики повреждений ПКС является тест ПВЯ. Он заключается в определении пассивного смещения голени кпереди. Если смещение голени превышает 5 мм, то результат теста признают положительным и предполагают разрыв ПКС [12]. Врач-травматолог проводит тест ПВЯ при согнутом на 60–90° коленном суставе в нейтральной позиции голени, а также при ее наружной и внутренней ротации. Это необходимо, чтобы всесторонне оценить биомеханику капсульно-связочного аппарата. Так, при наружной ротации голени происходит натяжение медиальных стабилизаторов, которые могут препятствовать ее переднему смещению [191]. При внутренней ротации тормозящее действие медиальных стабилизаторов прекращается, однако в состоянии натяжения находится ЗКС [12, 53]. Особые трудности могут возникать при диагностике однопучковых разрывов ПКС с помощью теста ПВЯ, когда неповрежденный пучок связки в нейтральном положении конечности препятствует переднему смещению большеберцовой кости. В таких случаях следует изменить биомеханику сохранившегося пучка связки с помощью наружной и внутренней ротации голени при проведении теста и таким образом зафиксировать факт смещения голени [136]. Ложноположительные результаты теста ПВЯ фиксируются при значимой гипотрофии четырехглавой мышцы бедра, ложноотрицательные – при выраженном болевом синдроме с рефлекторным спазмом мышц нижней конечности, при блокаде сустава хондромным телом или нестабильным фрагментом мениска [12, 37]. Сравнительный анализ теста ПВЯ обоих коленных суставов помогает сократить число ошибок.

Тест Лахмана наиболее информативен при острой травме сустава и невозможности его сгибания до 90° [93, 258]. Тест Лахмана выполняется при сгибании колена под углом в 15–30° и по сути является разновидностью теста ПВЯ. Для выполнения теста Лахмана врач-травматолог производит руками попытки смещения голени кпереди, а бедра кзади, добиваясь наружной ротации голени [109]. При явном смещении голени кпереди тест считают положительным и предполагают разрыв ПКС.

Относительно новым клиническим тестом считается тест lever sign. Другое название – Lelli's test или симптом рычага [236]. К достоинствам этого теста относится возможность его проведения сразу после острой травмы без значительного дискомфорта для пациента [201]. Суть теста состоит в том, что врач подкладывает кулак под икроножную мышцу, когда пациент лежит на спине. Исследователь проводит надавливание в сторону четырехглавой мышцы бедра [240]. При целой ПКС пятка поднимается над столом. Тест считается самым информативным в отношении частичных разрывов ПКС со 100% результатами чувствительности и специфичности в одном из пилотных исследований [236]. Однако, в исследовании P. Valsalam et al. (2020) чувствительность теста составила 85,6%, специфичность – 25%, прогностичность положительного результата (PPV) – 82,2%, прогностичность отрицательного результата (NPV) – 30% и точность 73,6% [265].

Все клинические тесты демонстрируют высокую чувствительность у пациентов с застарелыми, полными разрывами ПКС, в то время как для пациентов с острым и особенно частичным разрывом ПКС чувствительность может быть значительно меньше. Так, в исследовании A. Lelli et al. (2016) для теста Лахмана она составила 42%, ПВЯ – 29%, для pivot shift – 11% [236]. В систематическом обзоре P.A. Sokal et al. (2022), основанном на мета-анализе более 22 исследований, были получены следующие показатели чувствительности и специфичности для тестов: тест ПВЯ – 83% и 85%; тест Лахмана – 81% и 85%; pivot shift тест – 55% и 94%; lever sign тест – 83% и 91% соответственно. Для конкретных случаев чувствительность и специфичность теста Лахмана составляли: полные разрывы 68% и 79%; подострые и хронические травмы 70% и 77%. Pivot shift тест и lever sign тест являются лучшими тестами для подтверждения или исключения разрыва ПКС соответственно [241]. По мнению авторов этого исследования, диагностическая точность теста Лахмана, особенно при подострых и хронических повреждениях и при полных разрывах, сопоставима с другими тестами, а полученные в других исследованиях данные завышены [241].

Еще одним способом диагностики разрыва ПКС является использование артрометра KT-1000 (MEDmetric, США) и его аналогов типа Stryker (Stryker, США), GNRB (Genourob, Франция), Rolimeter (Aircast, Германия) [51]. Смысл их работы заключается в количественном измерении переднезаднего смещения большеберцовой кости при фиксированном положении бедра. Для проведения теста пациента просят лечь на спину, под колени подкладывается поддержка, обеспечивающая сгибание в колене под углом 30°. Пятки располагаются симметрично на позиционирующей чашке, которая ротирует большеберцовую кость на 15°. Затем устройство прикрепляется к ноге, смещение измеряется с помощью сенсорной площадки, которая является единственной подвижной частью KT-1000. Нагрузку на сустав можно варьировать от 67 до 134 Н. Сначала исследуется неповрежденный коленный сустав, затем с разрывом ПКС. Разница в переднем смещении большеберцовой кости более 5 мм у травмированного сустава расценивается как полный разрыв ПКС, от 3 мм до 5 мм – как частичный или полный разрыв [127].

Точность артрометров в диагностике разрывов ПКС по данным ряда исследований превосходит клинические тесты [126]. В мета-анализе C.F. van Eck et al. (2013) было показано, что с ростом силы трансляции, подаваемой на артрометр от 67 Н и 89 Н к 134 Н, чувствительность в диагностике повреждения ПКС возрастала от 54% и 78% к 93% соответственно, специфичность оставалась высокой в рамках 92–93%. Артрометр KT-1000 (MEDmetric, США) с максимальными параметрами приложенной силы имел наибольшую точность и положительную прогностическую ценность для диагностики разрыва ПКС [181].

Многие пациенты повреждают трансплантат ПКС в результате повторной острой травмы. Для этих ситуаций характерны жалобы на сильную боль в колене, отек и нестабильность, такие же как при разрыве нативной ПКС. Обращает на себя внимание, что у части пациентов после пластики ПКС без сопутствующей острой травмы могут также наблюдаться жалобы на рецидивирующую нестабильность, отек и/или боль в коленном суставе. Это требует тщательного клинического и лучевого обследования, поскольку многие молодые пациенты могут

компенсировать повреждение трансплантата ПКС эффективным двигательным контролем и силой мышц [89].

D.L. Johnson и F.H. Fu (1995) выделили три основных клинических признака и симптома, позволяющих считать реконструкцию ПКС неудачной: нестабильность, скованность и ограничение движений, боль в коленном суставе [172]. Недостаточная программа послеоперационной реабилитации сама по себе может привести к отторжению трансплантата ПКС, несмотря на правильно выполненную первичную операцию. Кроме того, даже при отсутствии выявленной причины реконструкцию ПКС можно считать относительно неудачной, если результаты пластики не соответствуют ожиданиям пациента. Это связано со снижением функциональных возможностей оперированного коленного сустава при любой спортивной активности или в профессиональном спорте.

1.3.1. Лучевая диагностика повреждения передней крестообразной связки до и после пластики

Рентгенография (РГ). РГ долгое время оставалась единственным методом диагностики патологии коленного сустава, в том числе и повреждения ПКС. Все признаки повреждения непосредственно ПКС на РГ являются косвенными.

Признак (глубокой) латеральной вырезки бедренной кости описывает импрессию на латеральной мыщелке бедренной кости в терминальной борозде, месте соединения нагружаемой суставной поверхности большеберцовой кости и пателлярной суставной поверхности мыщелка бедренной кости. В норме борозда расположена в пределах 10 мм от линии Блюменсаата (Blumensaat) в боковой проекции [267]. Вероятным механизмом является переразгибание или ударная травма со столкновением мыщелка бедренной кости и заднего плато большеберцовой кости во время вращательного движения, ответственного за повреждение ПКС, чаще всего при повороте со смещением [140]. Признак латеральной бедренной вырезки обычно сначала распознается на боковой рентгенограмме и указывает на костно-хрящевой перелом, а величина углубления

коррелирует с разрывом ПКС. У пациентов с доказанным разрывом ПКС глубина латеральной вырезки бедренной кости превышала 1,5 мм или была неровной [193].

Симптом переднего смещения большеберцовой кости диагностируется в случаях полного разрыва ПКС и проявляется передним подвывихом большеберцовой кости по сравнению с бедренной. Дислокация по РГ более 7 мм указывает на разрыв ПКС [90].

Перелом Сегонда (Segond) представляет собой авульсионный перелом латерального края плато большеберцовой кости и очень часто (в 75–100% случаев) сочетается с разрывом ПКС [145]. Он может быть распознан на прямых рентгенограммах как признак латеральной капсулы. В противоположность наиболее распространенному механизму разрыва ПКС, сопровождающегося вальгусным стрессом, перелом Сегонда обычно происходит в результате внутреннего скручивания и варусной нагрузки [160]. Чаще всего такие повреждения происходят при падениях, горнолыжном спорте, футболе, баскетболе и бейсболе [160].

Одним из дополнительных РГ-признаков для подтверждения или исключения острого разрыва ПКС является наличие или отсутствие крови (гемартроз) в коленном суставе, которую иногда можно визуализировать в боковой проекции. Отсутствие выпота в суставе практически исключает острый разрыв ПКС [147]. При разрыве ПКС в сочетании с внутрисуставным переломом кости может наблюдаться липогемартроз. За счет сепарации дериватов гемоглобина и липидной фракции костного мозга на РГ у отдельных пациентов можно увидеть неоднородный выпот с уровнем [78].

К РГ-симптомам внутрисуставного выпота относятся: увеличение расстояния между периартикулярными жировыми телами более 10 мм, исчезновение обычно хорошо видимого четкого заднего края сухожилия квадрицепса, смещение четырехглавой мышцы и надколенника кпереди [146].

Рентгенологическое наличие выпота в коленном суставе после травмы указывает на острый разрыв ПКС при отсутствии внутрисуставного перелома или манифестного артрита. Большинство острых разрывов менисков и повреждений

хряща не сопровождаются суставным выпотом, поскольку в них отсутствует васкуляризация. Кроме того, большинство пациентов с острыми разрывами ПКС имеют молодой возраст и не имеют сопутствующих хронических воспалительных заболеваний суставов. Таким образом, наличие или отсутствие посттравматического выпота на боковой рентгенограмме коленного сустава является важным косвенным признаком состояния ПКС [35].

Дугообразный симптом на РГ представляет собой отрывной перелом проксимального отдела малоберцовой кости в месте прикрепления комплекса дугообразных связок и часто ассоциирован с повреждением ПКС (по некоторым источникам до 90% случаев) [230]. Костный фрагмент является местом прикрепления латеральной коллатеральной связки, сухожилия двуглавой мышцы бедра или обеих [183]. Перелом чаще всего возникает в результате прямого удара по переднемедиальной части большеберцовой кости при разгибании коленного сустава, что приводит к заднелатеральному подвывиху большеберцовой кости при ее наружной ротации. Внезапное переразгибание колена с ротацией большеберцовой кости внутрь может вызвать этот же перелом [76].

Важность этой травмы заключается в том, что, если ее не выявить сразу, может развиться заднелатеральная нестабильность, которую сложно исправить и которая может привести к неудачной реконструкции ПКС [76]. Форма и размер костного отломка варьируют в зависимости от прикрепленных связок. Авульсионный перелом обычно небольшой, размером менее 1 см и затрагивает шиловидный отросток малоберцовой кости. На РГ отломок смещается кверху и медиально. Иногда перелом может быть больше и распространяться на латеральную часть малоберцовой кости [230]. Рентгенограммы в прямой проекции с небольшой внутренней ротацией нижней конечности лучше всего демонстрируют это повреждение [76].

Еще одним типом повреждения ПКС, которое можно зафиксировать на РГ, является авульсия ПКС от большеберцовой кости. Перелом межмышечкового возвышения большеберцовой кости является одним из наиболее частых переломов коленного сустава у детей и обычно наблюдается в возрасте от 8 до 14 лет [197].

Обычно это вызвано сильным переразгибанием или прямым ударом по дистальной части бедренной кости при согнутом колене. Повышенное напряжение ПКС обычно приводит к растяжению или частичному разрыву ПКС с последующим переломом межмыщелкового возвышения [21]. Перелом может быть несмещенным или смещенным, оскольчатый или неоскольчатый и иногда затрагивает заднюю часть межмыщелкового возвышения, особенно у взрослых [182]. У взрослых также высока вероятность повреждения медиального и латерального менисков, капсулы сустава, боковых связок, хряща.

Классификация М.Н. Meyer и F.M. McKeever (1970) создана для определения дальнейшей тактики ведения переломов межмыщелкового возвышения большеберцовой кости и включает 4 типа:

- тип I – неполный перелом или перелом без смещения;
- тип II — полный перелом передней части с ротацией, задняя часть кортикального слоя интактна;
- тип III – перелом со смещением;
- тип IV – перелом со смещением и фрагментацией [182].

Стресс-рентгенография (стресс-РГ) – широко используемый диагностический инструмент, который обеспечивает косвенную количественную оценку стабильности связочного аппарата коленного сустава. Она подходит для диагностики острой и хронической травмы ПКС [14, 73], оценки нестабильности до и после операции и мониторинга стабильности ПКС у пациентов после консервативного лечения [169]. Разные методы стресс-РГ используются для проверки стабильности связок с использованием переднего, заднего, варусного или вальгусного приложения силы к колену [229]. По сравнению с клиническим осмотром, стресс-рентгенограммы дают количественную и воспроизводимую информацию о функциональном дефиците в коленном суставе [210].

Неопытность врача, выраженный болевой синдром и отек области коленного сустава, а также сопутствующие повреждения связок могут исказить интерпретацию физикального осмотра, ограничивая его клиническое применение

[97]. Учитывая расхождения в надежности и воспроизводимости клинических тестов, стресс-РГ занимает свою нишу для объективной и количественной оценки разрыва ПКС и стабильности в суставе, что повышает диагностические возможности и влияет на тактику лечения [198].

Стресс-РГ может быть достаточно эффективной и доступной методикой диагностики нестабильности коленного сустава. Однако, многие факторы влияют на результаты стресс-РГ в клинических условиях, включая позиционирование пациента, положение коленей, мышечный тонус и степень мышечной релаксации, гравитацию, величину, направление и амплитуду применяемой для стресс-теста силы [262]. Кроме того, эластические свойства тканей, функциональная подготовка пациента, повреждения других связок колена, точность и воспроизводимость устройства, на котором проводят измерения, влияют на степень смещения большеберцовой кости [227].

Диагностическую эффективность разных методик стресс-РГ сравнивали с клиническими тестами и инструментальной артрометрией в выявлении повреждения ПКС. Одни исследования, сравнивающие стресс-РГ с артрометрами КТ-1000 или КТ-2000 для диагностики переднезадней нестабильности, доказывают, что стресс-РГ информативнее, тогда как другие показывают эквивалентные диагностические возможности [49, 150]. В другом исследовании результаты стресс-РГ коррелировали с результатами клинического теста pivot shift, но не теста Лахмана, были эквивалентны результатам артрометра GNRB (Genourob, Франция) и демонстрировали большую чувствительность, но аналогичную специфичность артрометру Rolimeter (Aircast, Германия) [73].

Главной причиной этого являются различные методы исследования и прилагаемой силы для провокации переднего смещения большеберцовой кости. Например, хотя во всех трех исследованиях J.L. Franklin et al. (1991) [205], H.U. Stäubli et al. (1992) [227], J.L. Lerat et al. (1993) [49] проводили сравнение стресс-РГ для диагностики травмы ПКС на артрометре КТ-1000 (MEDmetric, США), методики их исследований отличались. J.L. Franklin et al. применяли технику сокращения квадрицепсов с силой от 133 Н до 178 Н, H.U. Stäubli et al.

использовали КТ-1000 (MEDmetric, США) на 89 Н, а J.L. Lerat et al. оперировали со свободным весом в 9 кг.

На сегодняшний день нет единого стандарта и методики проведения стресс-РГ и необходимого порога приложения силы для верификации переднезадней и боковой стабильности колена. Кроме того, точность стресс-РГ меняется в зависимости от наличия анестезии, размера выборки, выбранного порога смещения между здоровым и поврежденным коленом [171]. Для ПКС этот диапазон варьирует от 2 мм [103] до 6 мм [49].

Компьютерная томография. КТ, как рутинный метод, используется в условиях неотложной помощи для диагностики переломов коленного сустава и в качестве предоперационного планирования [36].

ПКС может быть визуализирована на КТ, хотя ее визуализация ухудшается на фоне посттравматического гемартроза. Если авульсионный разрыв ПКС выявлен на РГ, КТ полезна в детектировании размера и смещения костного фрагмента, а трехмерная (3-dimensional, 3D) реконструкция позволяет лучше оценить зону перелома [71].

В отдельных исследованиях была показана высокая чувствительность 64-срезовой мультиспиральной компьютерной томографии в сравнении с МРТ в детектировании разрыва ПКС вне острой фазы, достигающая 87,5–100%, а одного или нескольких косвенных признаков разрыва ПКС в пределах 50–87,5% со специфичностью 100% [56]. Другие исследователи с помощью мультиспиральной компьютерной томографии смогли обнаружить неповрежденную ПКС с хорошей специфичностью, но оценка разрывов была ненадежной [185].

Новой вехой в развитии КТ при оценке связок является появление двухэнергетической компьютерной томографии (ДЭКТ). Хотя МРТ считается «золотым стандартом» неинвазивной диагностики разрыва ПКС, она имеет недостатки и ограничения у пациентов со специфическими противопоказаниями (например, магнитные имплантаты, кардиостимуляторы, клаустрофобия) [237]. ДЭКТ обладает способностью отличать мягкие ткани (например, связки и

сухожилия) от других суставных структур на основе дифференциального изменения плотности тканей, которое происходит на различных уровнях энергии [110]. Благодаря алгоритмам постобработки, конкретные материалы можно идентифицировать и маркировать цветом на монохроматических изображениях для легкого визуального обнаружения повреждений связок [110]. ДЭКТ также имеет свои преимущества перед традиционной КТ, включая улучшенную визуализацию костных повреждений, уменьшение артефактов от движения конечностей, сокращение времени сбора данных.

Для улучшения визуализации ПКС при ДЭКТ применяется алгоритм тканеспецифического картирования с оценкой значений 80 кэВ, смешанных кэВ, электронной плотности и эффективного атомного номера [263].

В исследовании D. Liu et al. (2023) чувствительность ДЭКТ в диагностике разрывов ПКС составила 97,1% по сравнению с 99,0% для МРТ; специфичность составила 98,0% для ДЭКТ против 100% для МРТ; точность составила 97,5% для ДЭКТ по сравнению с 99,5% для МРТ. Критерий МакНемара не выявил никаких различий между исследователями в обнаружении разрыва ПКС по данным МРТ и ДЭКТ ($p > 0,99$) [263].

В другом исследовании суммарная чувствительность ДЭКТ составила 76,3%, а МРТ – 86,8%, то есть возможности ДЭКТ в диагностике разрыва ПКС были ниже [217]. Тем не менее, ДЭКТ представляет собой новый неинвазивный метод диагностики повреждений связочного аппарата коленного сустава и может быть использована в клинической практике при наличии абсолютных противопоказаний к МРТ [28, 199].

После пластики ПКС КТ может быть рекомендована для оценки изменений костных каналов во время интеграции трансплантата, тогда как на обычной рентгенограмме часто сложно надежно идентифицировать канал и измерить его ширину [167].

T. Suzuki et al. (2011) установили с помощью КТ, что костный блок почти полностью интегрируется в бедренный канал через 8 недель после реконструкции ПКС с использованием трансплантата из собственной связки надколенника [115].

C. Fink et al. (2001) использовали КТ для мониторинга динамики изменений в течение 2 лет. Изменение размера каналов было значительно выше в течение первых 6 недель после операции по сравнению со всеми другими временными интервалами [256]. В другом исследовании после пластики ПКС аутооттрансплантатом из сухожилий подколенных сгибателей КТ показала увеличение диаметра бедренного канала на 3% при среднем сроке наблюдения 10 месяцев [85]. КТ также успешно была использована для сравнения степени расширения костных каналов в случае различных техник формирования тоннеля и способов фиксации [87].

КТ-артрография и виртуальная артроскопия. КТ-артрография представляет собой эффективную методику визуализации интраартикулярных структур коленного сустава и в отдельных случаях может применяться на первом этапе диагностики вместо МРТ [88]. Методика проведения КТ-артрографии предусматривает внутрисуставное введение до 50 мл раствора йодсодержащего контрастного препарата с последующей получасовой физической активностью, а также компрессию верхних отделов сустава эластичным бинтом для уменьшения объема суставных сумок [40]. КТ выполняется с наименьшей толщиной среза, рекомендуется также согнуть на 15° коленный сустав, так как это может увеличить пространство вокруг ПКС и дистанцию между менисками и хрящом [40].

Отдельные исследователи считают, что диагностическая эффективность КТ-артрографии в диагностике повреждений ПКС, менисков, хряща может быть сопоставима с МРТ [40, 226]. Другие подтверждают высокую точность КТ-артрографии в детекции разрывов менисков и хондромалиции, тогда как для повреждений ПКС результаты остаются неудовлетворительными [225].

Виртуальная артроскопия представляет собой трехмерное моделирование полученных изображений КТ-артрографии для детального изучения внутренних структур коленного сустава [100]. В нескольких исследованиях виртуальную артроскопию использовали как самостоятельную методику оценки повреждений менисков и ПКС с сопоставимыми с КТ результатами [98, 100]. В другом исследовании 3D-реконструкции применяли для предоперационного планирования

перед пластикой ПКС [165]. К достоинствам виртуальной артроскопии относится получение объемных изображений ПКС и менисков, схожих с таковыми при видеофиксации во время артроскопии. К недостаткам виртуальной артроскопии следует отнести компромиссное качество при навигации ПКС в бедренном сегменте и сильную зависимость от характера распределения контрастного вещества по ходу синовиальной полости.

КТ-артрография хорошо зарекомендовала себя в диагностике оперированного коленного сустава для оценки целостности трансплантата ПКС, менисков, положения костных каналов, миграции фиксирующих элементов, остеолита [40]. В исследовании М. De Filippo et al. (2009) при обследовании 37 прооперированных пациентов точность КТ-артрографии составила 95%, а МРТ только 53% [184].

Недостатки КТ-артрографии связаны с необходимостью внутрисуставной инъекции: данное исследование инвазивное, требует участия врачей-травматологов и сопряжено с риском инфекционных осложнений [106].

Ультразвуковая диагностика. УЗИ широко применяется для первичной диагностики и постоперационного контроля при заболеваниях коленного сустава. Однако несмотря на то, что ПКС часто повреждается при спортивных травмах, она обычно не включается в большинство протоколов УЗИ. В прошлом, из-за своей кривой траектории и достаточно глубокого расположения, ПКС считалась сложной структурой для УЗИ [80]. Благодаря достижениям в области ультразвуковых технологий и знаниям о соноанатомии коленного сустава, все больше исследователей изучают клиническую ценность УЗИ в диагностике повреждений ПКС до и после пластики [221].

УЗИ позволяет выявить несколько признаков разрыва ПКС, включая утолщение связки, гиперваскуляризацию внутрисвязочного пространства и отрыв места прикрепления ПКС к кости. Кроме того, могут наблюдаться косвенные признаки, такие как гипоэхогенное пространство в месте прикрепления к бедренной кости, S-образное утолщение ЗКС и утолщение задней фиброзной капсулы ПКС из-за отека или образования гематомы. Усиленный кровоток в ПКС,

часто визуализируемый с помощью цветного доплеровского картирования, может указывать на повреждение. На УЗИ также может быть видна авульсия фрагмента кости в месте прикрепления ПКС [137].

Для оценки диагностической эффективности УЗИ в выявлении разрывов ПКС и трансплантата было проведено несколько крупных мета-анализов за последние 10 лет. Исследование J. Wang et al. (2018) продемонстрировало чувствительность 90% и специфичность 97% для УЗИ в диагностике полных разрывов ПКС [253]. G. Schreiner et al. (2025) проанализировали 12 исследований, где УЗИ правильно идентифицировало 419 из 518 (81%) разрывов ПКС и 425 из 465 (91%) неповрежденных ПКС. Мета-анализ показал высокую общую специфичность (92%), но переменную чувствительность (84%). PPV была высокой для симптома гематомы в месте прикрепления ПКС (96%) и переднего смещения большеберцовой кости (97%), но низкой для визуализации самой ПКС (77%). NPV была гетерогенной для разных методов (симптом гематомы – 73%, визуализация ПКС – 87%, переднее смещение – 83%) [243]. В других исследованиях, оценивающих частичные и полные разрывы ПКС с помощью УЗИ и МРТ, отмечалось существенное преимущество МРТ перед УЗИ в чувствительности (92% и 79% соответственно) и специфичности (90% и 77% соответственно) [23].

Функциональное УЗИ высокого разрешения становится новым инструментом диагностики повреждений ПКС коленного сустава. Этот быстрый и легкодоступный метод оказался эффективен в ситуациях, когда ограничения по времени и стоимости являются решающими факторами. С помощью функционального УЗИ удастся оценить структуру ПКС в различных положениях колена, а также измерить степень переднего смещения большеберцовой кости, что свидетельствует о разрыве ПКС. В исследовании S. Kumar et al. (2018) чувствительность функциональной УЗИ в оценке повреждений ПКС составила 81,65%, специфичность – 89% [139].

Перспективные ультразвуковые методики фокусируются на реципрокных движениях между бедренной и большеберцовой костями при активном разгибании

коленного сустава, что может указывать на повреждение ПКС и ее трансплантата. Это явление напоминает клинический тест для определения разрыва ПКС – симптом рычага, при котором большеберцовая кость остается в переднем положении, а бедренная кость смещается кзади во время стресс-теста. Данный ультразвуковой метод позволяет визуализировать волокна ПКС в режиме реального времени для оценки ее эластичности [271].

Радионуклидная диагностика. Сцинтиграфия, однофотонная эмиссионная томография и позитронно-эмиссионная томография (ПЭТ) рутинно не используются для оценки повреждений ПКС. Отдельные исследования показывают повышенное накопление радиофармпрепарата (РФП) ^{99m}Tc -метилен-дифосфоната в проекции ПКС при разрыве, что впоследствии подтверждалось данными артроскопии [235].

После операции по пластике ПКС роль метаболических методик возрастает, так как сухожильный трансплантат ПКС подвергается периферической синовиальной васкуляризации и костной интеграции, что в итоге приводит к его инкорпорации. Нормальное течение этих процессов существенно влияет на успешность реконструкции ПКС. Несмотря на опасения, связанные с лучевой нагрузкой и стоимостью послеоперационной визуализации у пациентов, перенесших реконструкцию ПКС, ПЭТ может демонстрировать биологическую и метаболическую активность для оценки заживления и интеграции трансплантата [129]. ПЭТ с 18-фтордезоксиглюкозой чувствительна к метаболическим изменениям в коленном суставе после пластики ПКС и может быть использована в качестве биомаркера жизнеспособности трансплантата [58].

Было отмечено, что метаболическая активность физиологически снижается в трансплантатах через два года и более после реконструкции ПКС [134].

T. Hogervorst et al. (2000) исследовали большеберцовые костные каналы 68 пациентов через 2 года после реконструкции ПКС с помощью сцинтиграфии костей и обнаружили, что повышенное поглощение РФП было связано с расширением большеберцового канала более чем на 35% и длиной трансплантата в большеберцовом канале более 14 мм [55]. Они также пришли к выводу, что

возвращение к нормальному костному поглощению РФП в большеберцовом канале может занять более 2 лет, если фиксация осуществляется более чем на 14 мм ниже сустава [55].

В исследовании M.T. Hirschmann et al. (2013) была отмечена клиническая ценность однофотонной эмиссионной томографии у пациентов после реконструкции ПКС, где был представлен специальный алгоритм для анализа и регистрации положения тоннелей и накопления РФП [224].

С внедрением цифровых ПЭТ-систем нового поколения молекулярная визуализация трансплантатов ПКС может проводиться при крайне низкой лучевой нагрузке (менее 2 мЗв), что делает ПЭТ востребованным неинвазивным методом оценки критически важных метаболических изменений, особенно в спортивной медицине, включая возможность мониторинга эффективности терапии в динамике [134].

Магнитно-резонансная томография. МРТ играет ключевую роль в визуализации повреждений ПКС благодаря высокой точности при анализе мягких тканей и отсутствию ионизирующего излучения [32]. Кроме того, к достоинствам МРТ можно отнести возможность проведения исследования сразу после травмы, когда из-за гематомы, боли и отека клинические тесты недоступны. МРТ позволяет провести детальную оценку связок и менисков коленного сустава, а также параартикулярных мягких тканей [237].

Для диагностики патологии коленного сустава применяются томографы открытого и закрытого типа, а также портативные ортопедические магнитно-резонансные томографы. В отдельных исследованиях показано, что МРТ с напряженностью магнитного поля 3 Тл обладают большей точностью (до 95%) в диагностике частичных разрывов ПКС по сравнению с МРТ с напряженностью магнитного поля 1,5 Тл и ниже (25–53%) [62].

Кроме того, для получения изображений наилучшего качества необходима специализированная катушка для конечностей или прицельно для коленного сустава (жесткая квадратная или гибкая). Для улучшения пространственного разрешения изображения следует использовать небольшое поле зрения (Field of

View), соответствующее размеру колена (обычно 16 см). Для диагностики ПКС требуется толщина среза 3–4 мм и небольшой межсрезовой промежуток (не более 10%) [15].

Пациента укладывают на спину с выпрямленной ногой и разогнутым коленом. В случае обследования на предмет повреждения ПКС наружная ротация колена от 5° до 10° позволит расположить ПКС ортогонально сагиттальной плоскости и улучшить визуализацию [32]. Стандартный протокол МРТ коленного сустава обычно состоит из сагиттальной, коронарной и аксиальной проекций. Плохая визуализация нормальной ПКС на сагиттальных изображениях может наблюдаться у 5–10% пациентов, что требует дополнительных проекций для улучшения ее идентификации [62]. Исследования показали, что косые сагиттальные и фронтальные плоскости эффективны для повышения диагностической точности в оценке повреждения ПКС [86]. Косые фронтальные ИП повышают чувствительность и специфичность диагностики изолированных повреждений ПМ и ЗЛ пучков. Используя тонкие срезы (толщина среза 2–2,5 мм), два пучка ПКС можно дифференцировать как отдельные структуры. Более того, косая коронарная плоскость помогает визуализировать проксимальное прикрепление пучков при кровоизлиянии или разрыве в данной зоне [155].

Протокол МРТ коленного сустава в настоящее время состоит из комбинации ИП, таких как спин-эхо (Spin Echo, SE), быстрое или турбо спин-эхо (Fast Spin Echo, FSE или Turbo Spin Echo, TSE) и градиентное эхо (Gradient Echo, GRE). T2-взвешенные последовательности с жироподавлением (Fat Saturation, FS), или последовательности, взвешенные по протонной плотности (Proton Density, PD) также с жироподавлением, используются для визуализации жидкости в виде гиперинтенсивного сигнала, что позволяет лучше визуализировать отек, кровь и выпот, которые часто сопровождают повреждения ПКС [13]. T1-взвешенные изображения (ВИ) используют для визуализации анатомических структур и оценки линий перелома в коленном суставе [36].

В целом, чувствительность МРТ в выявлении разрывов ПКС значительно варьирует – от 63% до 100%, специфичность – от 68% до 100% [242].

Это объясняется как сложностями положения и строения связки (кососагиттальный ход, двухпучковая структура), так и особенностями МРТ коленного сустава, оценивающего только анатомию ПКС (структурные аномалии в самой связке, нарушение непрерывности ее волокон, волнистый контур, изменение интенсивности МР-сигнала).

Все признаки разрыва ПКС можно разделить на прямые и косвенные (непрямые) [202]. В случае острого полного разрыва ПКС к прямым признакам относятся невозможность визуализации волокон ПКС на снимках, полученных в любой плоскости, или разрыв волокон ПКС, видимый в двух разных плоскостях визуализации. Другим признаком является наличие аномальной морфологии, характеризующейся неровным или волнистым контуром ПКС или аномальной ориентацией ее волокон. В результате волокна связки не параллельны крыше межмышцелковой вырезки или расположены более параллельно большеберцовому плато. Ориентацию волокон ПКС можно объективно измерить, как описано A. Gentili et al. (1994) [70], двумя способами. Во-первых, угол ПКС измеряется между линией, проходящей вдоль передней поверхности ПКС, и второй линией, проходящей параллельно середине латерального плато большеберцовой кости. Угол менее 45° считается патологическим. Во-вторых, угол между передней поверхностью волокон ПКС и линией, проходящей вдоль крыши вырезки бедренной кости (линия Blumensaat). Угол, превышающий 9° , считается патологическим.

Примерно 28% всех разрывов ПКС представляют собой частичные разрывы, которые могут возникнуть в ПМ или ЗЛ пучках [257]. Чувствительность (40–77%) и специфичность (51–97%) МРТ в детекции частичных разрывов ПКС существенно ниже, чем полных [255]. Следует подозревать частичный разрыв ПКС, если: связка выглядит утолщенной на МРТ с гиперинтенсивным сигналом на T2-ВИ; ПКС имеет нормальную толщину с непрерывным ходом волокон и аномальной интенсивностью сигнала; визуализируется аномальная морфология ПКС без нарушения целостности волокон. Видимые непрерывные волокна связки на МРТ указывают на то, что разрыв ПКС неполный [255].

Хронические разрывы ПКС имеют более разнообразную картину на МРТ, что иногда затрудняет диагностику этого типа повреждения. Это связано с тем, что некоторые признаки, присутствовавшие в острой стадии травмы, такие как отек и утолщение волокон ПКС, уменьшаются к моменту обследования. При хроническом полном разрыве наблюдается отсутствие ПКС в типичном месте, демонстрируя симптом пустой выемки, когда ПКС замещена жидкостью [194]. Нередко хронический разрыв замещается фиброзной рубцовой тканью, напоминающей неповрежденную связку с гипointенсивным сигналом на всех ИП, который соединяет предполагаемое начало и место прикрепления ПКС [194]. Иногда проксимальные волокна разорванной ПКС прикрепляются к ЗКС, что приводит к аномальным углам хода ПКС, как при ее острых разрывах.

Известны многочисленные косвенные МР-признаки разрыва ПКС, которые связаны с механизмом травмы или сопутствующими повреждениями коленного сустава. Передний подвывих большеберцовой кости фиксируется при полном разрыве ПКС и заключается в ее переднем смещении относительно бедренной кости в сагиттальной плоскости на уровне наружного мыщелка [39, 202]. Переднее смещение, равное 3,5 мм, указывает на разрыв ПКС с чувствительностью 55,2% и специфичностью 100% [54], смещение более 5 мм имеет чувствительность от 58% до 86% и специфичность 93–99%, а дислокация на 7 мм и более считается 100% диагностическим признаком разрыва ПКС [29].

Вследствие переднего подвывиха большеберцовой кости может быть визуализирован задний рог латерального мениска, а также становится возможна полная визуализация латеральной коллатеральной связки на одном фронтальном изображении [29].

Среди вторичных признаков разрыва ПКС, возникающих при вращении со сдвигом (*pivot shift*) – симптом глубокой вырезки бедренной кости, также известный как симптом борозды. Он определяется как углубление на латеральном мыщелке бедренной кости, возникающее из-за костного удара между терминальной бороздой латерального мыщелка бедренной кости и заднелатеральным плато большеберцовой кости во время вращательного

движения. Глубина импрессии не менее 2 мм на МРТ является надежным косвенным признаком разрыва ПКС [151].

Другим косвенным признаком разрыва ПКС является ушиб кости, который можно обнаружить по изменению интенсивности сигнала от костного мозга за счет его отека/контузии (снижение интенсивности сигнала на T1-ВИ и повышение интенсивности сигнала на T2- и PD-ВИ) [29]. Ушибы костей можно визуализировать в средней и передней части латерального мыщелка бедренной кости и заднелатеральной поверхности плато большеберцовой кости (в том числе по типу «целующихся контузий»). Этот тип ушиба обычно вызван внезапным сильным вращательным моментом, наружной ротацией и вальгусным ударом между задней поверхностью плато большеберцовой кости и латеральным мыщелком бедренной кости.

Частота перелома Segond наблюдается в 2,4% случаев при повреждениях ПКС и обычно связана с более высокой вероятностью сопутствующего разрыва латерального мениска. При этом визуализируется очаговый отек костного мозга рядом с местом перелома, дающий патологический сигнал на МРТ [62].

Вторичные изменения в ЗКС, такие как ангуляция ЗКС или ее прогиб, также являются косвенными признаками разрыва ПКС. Угол ЗКС измеряется путем проведения линий через центральную часть большеберцовой кости и бедренную часть ЗКС. Если угол меньше 105° , это считается положительным признаком разрыва ПКС [239]. Измерение угла нижней части ЗКС также может улучшить диагностику частичных разрывов ПКС [239].

Еще одним признаком разрыва ПКС является скрытый (импрессионный) перелом заднелатерального плато большеберцовой кости с сопутствующим переломом латерального мыщелка бедренной кости или без него. Увеличение межкостного угла более $4,9^\circ$ также является непрямым признаком, который может указывать на повреждение ПКС [215].

К ассоциированным, но неспецифичным признакам разрыва ПКС можно отнести гемартроз, повреждение заднего рога латерального мениска, выпот между крестообразными связками, сочетанные повреждения менисков, коллатеральных

связок и заднелатерального комплекса. Например, сочетанный разрыв ПКС, медиальной коллатеральной связки и медиального мениска носит название «несчастливой триады» [261].

Ряд факторов и условий может повлиять на точность МР-диагностики повреждения ПКС. Во-первых, использование неоптимального протокола визуализации может снизить разрешение и качество изображения, затрудняя диагностический процесс. Во-вторых, частичные разрывы, которые могут вызывать лишь незначительные изменения анатомии ПКС на статичной МРТ, могут привести к ложноотрицательным результатам [57].

Нельзя не отметить большое значение МРТ после операции реконструкции ПКС, когда необходимо оценить степень васкуляризации и лигаментизации донорских сухожилий, инкорпорацию костных блоков или интерференц-шурупов, исключить повторную травму трансплантата [156].

МР-семиотика разрыва трансплантата на МРТ такая же, как и для нативной ПКС: разрыв волокон трансплантата или дефект интенсивности сигнала от жидкости в его проекции; аномальная (горизонтальная) ориентация волокон; удлинение и растяжение волокон и их беспорядочное расположение; истончение трансплантата; фокальная или диффузная область повышенного сигнала от трансплантата на PD FS-ВИ [175].

В течение первых 3-х месяцев после операции на ПКС трансплантаты аваскулярны и дают МР-сигнал, аналогичный сигналу нативной ПКС. Через 4–8 месяцев трансплантаты подвергаются реваскуляризации и имеют промежуточный или высокий сигнал на T2- и PD-ВИ, что представляет дополнительные трудности для дифференцирования с частичным или внутрисухожильным повреждением в этот период. Через 12 месяцев трансплантаты подвергаются лигаментизации, в результате чего МР-сигнал становится вновь аналогичным сигналу нативной ПКС, хотя иногда это может занять до 24 месяцев [272].

Лишь небольшое количество исследователей проанализировали точность МРТ в диагностике разрывов трансплантатов ПКС. Для полных разрывов

чувствительность составила 73,9–97,8% и специфичность 82,1–80%, для частичных разрывов чувствительность 22,5–47% и специфичность 67–76,4% [120, 121, 173].

Основными аспектами МР-исследований для повышения точности диагностики повреждений трансплантата ПКС до сих пор остаются уменьшение толщины среза и использование новых ИП [180]. Использование косых сагиттальных и фронтальных срезов по оси трансплантата может незначительно повышать точность и достоверность выявления его повреждений [121].

Растяжение или удлинение трансплантата может способствовать развитию нестабильности коленного сустава при неповрежденных волокнах трансплантата [157]. Это может быть вызвано неправильным расположением бедренного и большеберцового каналов. Бедренный канал, значительно смещенный кпереди, подвергает трансплантат повышенной нагрузке при сгибании колена, а также импинджменту трансплантата при разгибании, что может привести к его растяжению [157]. На МРТ растянутый трансплантат может иметь изгиб кзади, однако низкие показатели PPV не позволяют использовать стандартное МРТ для прогнозирования передней нестабильности колена и сделать вывод о необходимости проведения повторной артроскопии [68].

1.3.2. Артроскопическая оценка повреждения передней крестообразной связки до и после пластики

На сегодняшний день артроскопия остается «золотым стандартом» прецизионной оценки внутрисуставных структур коленного сустава, в том числе ПКС и ее трансплантата [124]. К преимуществам артроскопии можно отнести ее универсальность – она подходит как для диагностики, так и для лечения. Однако этот метод инвазивный и дорогостоящий, а также менее эффективен по сравнению с МРТ для оценки состояния экстракапсулярных мягких тканей, инкорпорации костных каналов или других осложнений пластики за пределами суставной полости [32].

Артроскопия позволяет напрямую визуализировать ПКС и ее трансплантат. Полный разрыв при этом выглядит как видимый перерыв волокон, часто с неровными краями или ретракцией культы. При частичном разрыве могут быть видны некоторые неповрежденные волокна с видимым разрывом в толще связки или трансплантата. Частой находкой при острых разрывах ПКС, обнаруженных при артроскопии, является гемартроз [75]. Исчезающая «конечная точка» при зондировании и гипермобильность большеберцовой кости при нагрузке или проведении клинических тестов интраоперационно также относятся к артроскопическим признакам разрыва ПКС [240].

В случаях несостоятельности ПКС хирург может обнаружить отсутствие нормальной поддержки со стороны ЗКС, что приводит к появлению симптома «пустой стенки» или «вертикальной опоры», указывающего на недостаточную стабильность задней поверхности коленного сустава [77]. При разрыве ПКС может также наблюдаться «симптом щели» – видимое пространство или щель в медиальном мениске, указывающее на его нестабильность вследствие разрыва ПКС.

При частичных разрывах ПКС артроскопия может помочь визуализировать отдельные пучки ПКС (ПМ и ЗЛ) для оценки их структурной целостности. Во время артроскопии можно провести тест продавливания. Положительный симптом продавливания указывает на то, что визуально неповрежденный пучок ослаблен и имеет структурные повреждения, что позволяет предположить наличие разрыва [79].

Процесс заживления трансплантата ПКС представляет собой сочетание нескольких биологических событий, включая воспалительную реакцию, некроз трансплантата, реваскуляризацию, репопуляцию клеток, костную интеграцию, ремоделирование коллагена и лигаментизацию [81]. Эти процессы можно разделить на три этапа: раннее заживление, пролиферацию и фазу созревания, а неблагоприятное их течение приводит к несостоятельности трансплантата.

Повторная артроскопия коленного сустава после реконструкции ПКС является одним из наиболее надежных методов оценки заживления трансплантата

ПКС, таких как синовиализация и васкуляризация. Синовиализация играет важную роль в заживлении трансплантата, и нарушение сроков этого процесса, видимое при артроскопии, часто ассоциировано с повреждением трансплантата. M. Ochi et al. (2016) продемонстрировали значительно лучшее покрытие трансплантата синовиальной оболочкой через 18 месяцев после реконструкции ПКС с помощью повторной артроскопии, синовиальное покрытие трансплантатов при этом классифицировалось следующим образом: хорошее ($> 80\%$ трансплантата), удовлетворительное (покрытие 50–80%) и плохое ($< 50\%$ трансплантата) [59].

Кроме того, артроскопия стала важным инструментом для получения образцов биопсии с целью оценки процесса заживления трансплантата и его состоятельности [272].

Артроскопия в реальной практике, однако, не обладает 100% точностью в детекции повреждений как ПКС, так и трансплантата, а также является оператор-зависимой методикой [95]. Визуальная оценка ПКС и трансплантата при артроскопии не всегда дает точное представление о их функциональной состоятельности, при этом может потребоваться проведение клинических тестов для верификации нестабильности под анестезией [60].

1.4. Современный взгляд на тактику лечения и реабилитации пациентов с повреждением передней крестообразной связки до и после пластики

Лечение повреждения ПКС и ее трансплантата должно быть персонализированным. На сегодняшний день применяются как хирургические, так и консервативные методы лечения [260]. При принятии решения о выборе метода лечения разрыва ПКС следует учитывать множество факторов, включая возраст и потребности пациента, уровень активности, участие в спортивных мероприятиях, а также наличие повреждений других поддерживающих и стабилизирующих структур [260].

Неотложная терапия включает в себя покой, холод, компресс на травмированный коленный сустав и возвышенное положение нижней

конечности [209]. Пациенты не должны нагружать поврежденную ногу и при необходимости могут пользоваться костылями или инвалидной коляской. Для облегчения боли назначают нестероидные противовоспалительные средства [209].

Консервативное лечение показано при повреждении ПКС у пациентов с низкой нагрузкой или спортсменов, занимающихся видами спорта, не связанными с резкими движениями или поворотами. Таким пациентам обычно назначают физиотерапию и коррекцию образа жизни. Консервативное лечение также показано при частичном разрыве ПКС без функциональной нестабильности [144, 209]. Оно включает в себя симптоматическое лечение в острую фазу повреждения. В последующем назначается 12-недельный курс контролируемой физиотерапии, начиная с восстановления полного диапазона движений и постепенно переходя к укреплению четырехглавой мышцы бедра, подколенных сухожилий, приводящих мышц бедра и мышц туловища. Применение функциональных ортезов не приводит к повышению функциональной стабильности в травмированном коленном суставе [144, 209].

В исследованиях отмечается, что консервативное лечение также связано с повышенным риском повреждения менисков и суставного хряща из-за повторяющихся эпизодов «податливости», особенно при наличии активности I или II уровня, такой как тяжелый ручной труд или виды спорта с вертикальными движениями, прыжки и резкие движения [128].

Основными вариантами оперативного лечения разрыва ПКС являются восстановление или пластика (реконструкция) связки [25, 74, 101].

Пластика ПКС показана при полном разрыве у молодых пациентов или пожилых пациентов с высокой физической активностью. Основной целью пластики является анатомическая реконструкция ПКС для восстановления передней и ротационной стабильности, что снижает риск вторичных повреждений менисков, других связок или хряща [74, 101]. Пациентам рекомендуется пройти реабилитацию для достижения полного объема движений перед операцией, чтобы снизить риск послеоперационного артрофиброза. Частичный разрыв ПКС

с функциональной нестабильностью также является показанием к реконструкции [101]. Возврат к занятиям спортом после реконструкции во многом зависит от множества демографических, функциональных и психологических факторов [25, 74, 101].

В качестве хирургической техники пластики ПКС на сегодняшний день в подавляющем большинстве случаев используется артроскопия [4, 25].

Подготовка ложа трансплантата осуществляется либо путем полного удаления остатков нативной ПКС, либо путем оставления культи в качестве ориентира для позиционирования тоннеля и ускорения заживления; различий между этими подходами не выявлено [24]. Также не выявлено различий в результатах одно- и двухпучковой реконструкции. Однопучковая реконструкция по-прежнему остается наиболее распространенной методикой [6]. Двухпучковая реконструкция может улучшить нативную кинематику коленного сустава и повысить его стабильность [6].

Размещение тоннеля со стороны бедренной кости следует проводить транстибиально или независимо от большеберцовой кости, либо изнутри наружу, либо снаружи внутрь. В идеале размещение тоннеля в сагиттальной плоскости должно располагаться в пределах 1–2 мм от кортикального слоя задней бедренной кости [1, 61]. Во фронтальной плоскости цель заключается в том, чтобы расположить трансплантат более горизонтально, чтобы уменьшить ротационную нестабильность. Таким образом, используя циферблат боковой стенки, трансплантат следует расположить на 2 часах для левого колена или на 10 часах для правого колена. Для правильного позиционирования бедренного тоннеля следует использовать переднемедиальные и медиальные порты. Сверление под углом более 70° позволит избежать разрыва задней стенки [1, 61].

Предварительная подготовка трансплантата может снизить релаксацию напряжения до 50%. Натяжение с усилием 20 Н или 40 Н не оказывает клинического влияния на результаты. Трансплантат следует фиксировать под углом 20–30°. Доступны различные варианты фиксации, которые можно использовать как по отдельности, так и в комбинации. Апертурная или

компрессионная фиксация может быть достигнута с помощью интерферентного винта, тогда как поддерживающая фиксация может быть достигнута с помощью кортикальных кнопок, винтов и шайб-штифтов или скоб [27].

Вновь набирает популярность восстановление ПКС, особенно в педиатрии. Используются различные методы, включая динамическую интралигаментарную стабилизацию, внутреннюю аугментацию связок с помощью корсета и биологическую коррекцию, такую как мостовидное усиление ПКС. Двухлетние результаты показывают сопоставимые результаты [128].

Повторная реконструкция ПКС показана в случаях неудачной операции, когда нестабильность в суставе нарушает желаемую активность пациента. При рассмотрении возможности повторной пластики необходимо определить причину повторного разрыва, а также оценить любые пропущенные сопутствующие травмы. Также следует учитывать предшествующий выбор трансплантата и рассмотреть возможность использования более прочных трансплантатов, например сухожилия четырехглавой мышцы бедра, подколенных сухожилий или аллотрансплантатов. Аллотрансплантаты, используемые для первичной реконструкции, имеют в два раза более высокий риск повторного разрыва по сравнению с ревизионными случаями. Костный трансплантат из сухожилия надколенника, полученный повторно, противопоказан [38].

Следует рассмотреть возможность комбинированной фиксации, апертуры и подвешивающей фиксации. Кроме того, если предыдущее расширение тоннеля составляет 15 мм или предыдущая траектория тоннеля затрудняет его анатомическое формирование, следует рассмотреть возможность костной пластики и поэтапного вмешательства. Обеспечение дополнительной стабильности путем реконструкции переднебоковой связки или латерального внесуставного тенодеза остается спорным вопросом [128].

Наибольшую популярность для реконструкции ПКС приобрели следующие виды аутооттрансплантатов: из собственной связки надколенника, из сухожилия квадрицепса бедра, сухожилий подколенных сгибателей и сухожилия длинной малоберцовой мышцы [44]. Травматолог-ортопед делает выбор в пользу того или

иногo трансплантата, исходя из своей технической оснащенности, доступности тех или иных фиксаторов, предпочтений и характера спортивной активности пациента [44].

Важными особенностями ауто трансплантатов является их происхождение из сухожилий, которые, как и связки, относятся к соединительной ткани, но отличаются по эластичности и скорости заживления. Поэтому прочность ауто трансплантата должна быть выше прочности нативной ПКС. Кроме того, донорским сухожилиям требуется время на реваскуляризацию и ресиновилизацию в полости коленного сустава [44].

Аллотрансплантаты для пластики ПКС в современной артроскопической хирургии менее востребованы, несмотря на сокращение времени операции и отсутствия дополнительной травматизации в месте забора сухожилий. Это связано с меньшей прочностью аллотрансплантатов. Так, риск повторного разрыва аллотрансплантата у молодых спортсменов в четыре раза выше, чем ауто трансплантата [2, 190]. Кроме того, существуют потенциальные риски заражения вирусными инфекциями (вероятность заражения вирусом иммунодефицита человека менее 1/1,6 миллионов случаев) и лизиса аллотрансплантата. Пяточное сухожилие, сухожилия подколенных и большеберцовых мышц часто выбирают в качестве аллотрансплантатов для пластики ПКС.

Синтетические протезы ПКС имеют низкую биосовместимость, устойчивость к износу, что ограничивает их широкое применение. Потенциальные возможности их применения связаны с аугментацией ауто трансплантатов. При такой технике операции синтетический протез защищает ауто трансплантат в период его лигаментизации [128, 190].

При первичной реконструкции ПКС предпочтение часто отдают ауто трансплантату из сухожилий полусухожильной и тонкой мышц. Он имеет высокую прочность, с максимальной нагрузкой до разрушения 4000 Н (что вдвое превышает прочность нативной ПКС), может состоять из двух, четырех и даже шести пучков, доступен для извлечения с контралатеральной стороны (например,

при ревизионной пластике ПКС). Особенности данного трансплантата являются низкая травматичность и небольшие разрезы, что снижает болевой синдром, характерный для трансплантатов из собственной связки надколенника. Редкие осложнения, зарегистрированные после выделения подколенного сухожилия, включают остаточную слабость подколенного сухожилия и парестезию, вызванную повреждением ветвей подкожного нерва [31, 216].

Ауто трансплантат из связки надколенника с костными блоками – еще один распространенный тип трансплантата в современной артроскопической хирургии коленного сустава. Он обладает более быстрой интеграцией благодаря костно-костному сращению и считается «золотым стандартом» с максимальной нагрузкой до разрушения 2600 Н (для интактной ПКС данный показатель равен 1725 Н). Однако при его использовании наблюдается самая высокая частота послеоперационных болей в передней части колена, особенно при стоянии на коленях (10–30%). Кроме того, существует риск перелома надколенника и разрыва собственной связки надколенника. Риск повторного разрыва выше у пациентов моложе 20 лет и при размере трансплантата менее 8 мм [3, 32].

Ауто трансплантат из сухожилия четырехглавой мышцы бедра предпочтителен тем, что забор материала находится вдали от зон давления при стоянии на коленях. В педиатрии трансплантат не затрагивает эпифиз в отличие от трансплантата из собственной связки надколенника. Максимальная нагрузка до разрушения составляет 2185 Н. Используется либо только мягкотканый, либо костный блок надколенника. Недостатки аналогичны ауто трансплантату из сухожилий подколенных сгибателей [174].

Сухожилие длинной малоберцовой мышцы является перспективной альтернативой для реконструкции ПКС, особенно при множественных разрывах связок коленного сустава. Ауто трансплантат из сухожилия длинной малоберцовой мышцы обладает необходимой прочностью и биомеханическими свойствами, при этом его извлечение достаточно легкое, а использование не наносит ущерба функции голеностопного сустава [18, 270].

Идеальные сроки реконструкции ПКС определяются множеством факторов, такими как характер и сроки травмы, физическая активность и спортивный статус пациента, наличие сопутствующих повреждений в суставе, и должны определяться индивидуально пациентом и травматологом в каждом конкретном случае [32, 216].

Непосредственный послеоперационный уход должен включать массивную криотерапию. Криотерапия с использованием холодových компрессионных устройств в первые 24–48 часов после пластики ПКС уменьшает боль и уменьшает потребность в применении нестероидных противовоспалительных средств по сравнению с отсутствием криотерапии [117].

Раннюю реабилитацию следует начинать с упражнений, не оказывающих чрезмерной нагрузки на трансплантат. Следует подчеркнуть важность раннего полного пассивного разгибания, особенно при сопутствующем повреждении медиальной коллатеральной связки или вывихе надколенника. Через три недели после операции эксцентрическое растяжение четырехглавой мышцы бедра увеличивает ее объем и силу. Другие упражнения включают изометрические сокращения подколенных сухожилий и четырехглавой мышцы бедра, а также укрепление осевых мышц туловища и ягодичных мышц. Следует акцентировать внимание на упражнениях с замкнутой цепью, таких как приседания или жим ногами. В период ранней реабилитации следует избегать некоторых упражнений, таких как изокинетическое укрепление квадрицепса ($15\text{--}30^\circ$), разгибание ног, подобное тесту ПВЯ [5, 20].

В нескольких исследованиях оценивались результаты нейромышечной электростимуляции после пластики ПКС. Значительный клинический эффект был продемонстрирован при добавлении от 2 до 6 сеансов в неделю к стандартному протоколу реабилитации, что привело к улучшению силы четырехглавой мышцы бедра в первые 4–12 недель после операции [188].

В исследовании A.R. Gamble et al. (2021) не было выявлено никаких преимуществ реабилитации в больнице по сравнению с системной реабилитацией на дому в отношении силы четырехглавых мышц и мышц задней поверхности

бедра, слабости колена и функциональности как в краткосрочной, так и в долгосрочной перспективе после травмы и операции [163].

X.G. Yang et al. (2019) показали, что ортезирование колена после пластики ПКС не оказывает положительного влияния на его гибкость и физическую функцию [244].

Предоперационная реабилитация, включающая мышечное укрепление и тренировки на нервно-мышечную стабильность в течение 3–6 недель, улучшает самочувствие и физическую функцию через 3 месяца после операции, но не влияет на возвращение к спортивным результатам [245].

После пластики ПКС низкий или очень низкий уровень доказательности имеют такие методы как психологические тренинги, вибрации всего тела, прием белковых добавок для увеличения объема и силы четырехглавой мышцы, тренировки с ограничением кровотока для увеличения размера четырехглавой мышцы и сухой мышечной массы, упражнения на нервно-мышечный контроль и непрерывное пассивное движение [108, 118, 119, 231].

Возврат к физической активности варьируется и зависит от пациента. В среднем возвращение к полной активности или участию в спортивных состязаниях оценивается в пределах от 6 до 12 месяцев после хирургической реконструкции [5]. Однако некоторые исследования показали, что трансплантату требуется до 18 месяцев и более для полной функциональности и интеграции. Раннее, преждевременное возвращение к активности может привести к повторной травме и отторжению трансплантата [5].

ГЛАВА 2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

2.1. Общая характеристика собственного материала

За период с 2022 по 2025 гг. было обследовано 130 человек, включенных в исследование: 32 здоровых добровольца, 60 пациентов с подозрением на повреждение ПКС, 38 пациентов с подозрением на повреждение трансплантата ПКС. Здоровые добровольцы были обследованы в следующих медицинских центрах: АНО ЦКБ Святителя Алексия; Университетская клиническая больница № 1 ФГАОУ ВО Первый МГМУ имени И.М. Сеченова Минздрава России (Сеченовский Университет); ФГБУ «Центральная клиническая больница с поликлиникой» Управления делами Президента РФ; ГБУЗ «ГКБ им. М.П. Кончаловского ДЗМ». Все пациенты с подозрением на повреждение ПКС или трансплантата были обследованы в АНО ЦКБ Святителя Алексия.

Все здоровые добровольцы были информированы и подписали добровольное информированное согласие на участие в исследовании. Протокол проведения научного исследования был одобрен Локальным этическим комитетом ФГАОУ ВО Первый МГМУ имени И.М. Сеченова Минздрава России (Сеченовский Университет) №22-25 от 30.10.2025 г.

Критерии включения пациентов в исследование:

1. Наличие письменного информированного согласия пациента на участие в исследовании.
2. Возраст от 18 до 90 лет.
3. Мужской и женский пол.
4. Пациенты с подозрением на повреждение ПКС по данным клинического осмотра.
5. Пациенты с подозрением на повреждение трансплантата после пластики ПКС по данным клинического осмотра.

6. Здоровые добровольцы без жалоб и травм колена в анамнезе, без признаков повреждения ПКС по данным клинического осмотра.

Критерии не включения пациентов в исследование:

1. Возраст младше 18 лет или старше 90 лет.
2. Общие противопоказания к выполнению МРТ.
3. Пациенты в общем тяжелом (бессознательном) состоянии.
4. Пациенты с насильственными подергиваниями нижних конечностей у спинальных пациентов, при хорее Гентингтона, болезни Паркинсона и пр.

Критерии исключения пациентов из исследования:

1. Отказ пациента от дальнейшего участия в исследовании.

На первом этапе с 2022 по 2024 гг. было проведено многоцентровое исследование 32 здоровых добровольцев без признаков повреждения ПКС по данным клинического осмотра, без травм и оперативного вмешательства на коленном суставе в анамнезе. В группе здоровых добровольцев возраст колебался от 21 до 81 года, средний возраст составил 44,4 года (средний возраст мужчин 43,5 года; средний возраст женщин 45,2 года).

Распределение здоровых добровольцев по возрасту с группировкой по 10-летним интервалам представлено на Рисунке 1.

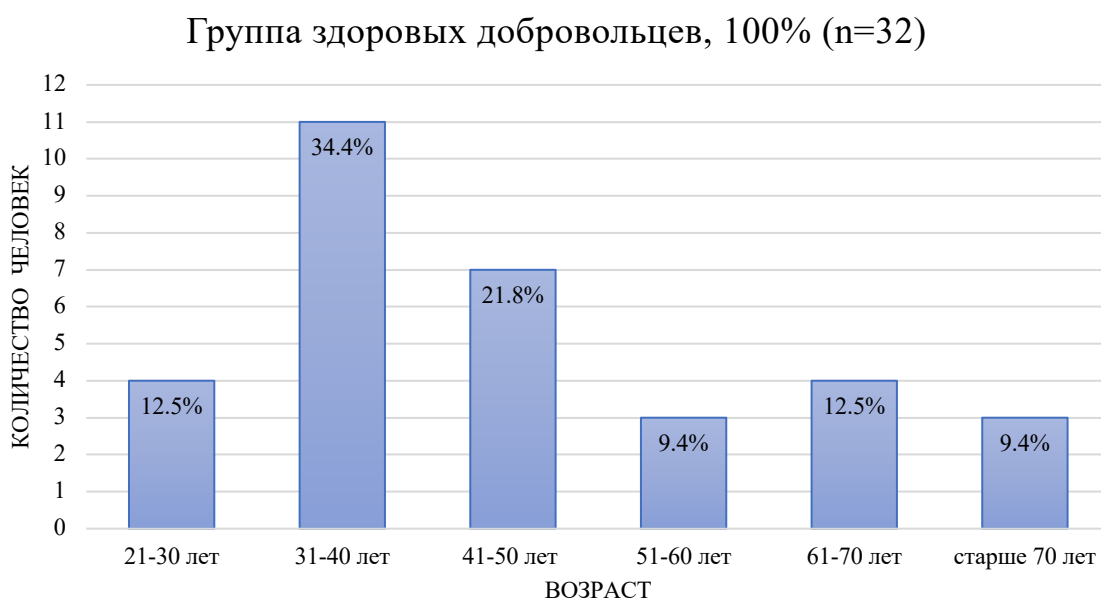


Рисунок 1 — Диаграмма распределения здоровых добровольцев по возрасту

Среди здоровых добровольцев было обследовано 15 (46,9%) мужчин и 17 (53,1%) женщин.

Исследования были проведены на следующем оборудовании: 62,5% человек (n = 20) – General Electric (США), 18,8% человек (n = 6) – Philips (Нидерланды), 18,8% человек (n = 6) – Siemens (Германия).

В ходе исследований 27 (84,4%) здоровых добровольцев было обследовано на МР-томографах с напряженностью магнитного поля 1,5 Тл, 5 (15,5%) на МР-томографе с напряженностью магнитного поля 3 Тл; 15 (46,9%) здоровых добровольцев были обследованы на томографе с шириной апертуры гентри 60 см, 17 (53,1%) добровольцев на томографах с шириной апертуры гентри 70 см.

Итоговое распределение здоровых добровольцев по медицинским центрам с указанием производителя, напряженности магнитного поля томографа и ширины апертуры гентри (Рисунок 2):

- 46,9% человек (n = 15) в АНО ЦКБ Святителя Алексия, на МР-томографе 1,5 Тл Creator (General Electric, США), с апертурой гентри 60 см;
- 18,75% человек (n = 6) в ГБУЗ «ГКБ им. М.П. Кончаловского ДЗМ», на МР-томографе 1,5 Тл Ingenia, (Philips, Нидерланды), с апертурой гентри 70 см;
- 18,75% человек (n = 6) в Университетской клинической больнице № 1 ФГАОУ ВО Первый МГМУ имени И.М. Сеченова Минздрава России (Сеченовский Университет), на МР-томографе 1,5 Тл Aera (Siemens, Германия), с апертурой гентри 70 см;
- 15,6% (n = 5) в ФГБУ «Центральная клиническая больница с поликлиникой» Управления делами Президента РФ на МРТ 3 Тл Pioneer (General Electric, США) с апертурой гентри 70 см.

Распределение здоровых добровольцев по медицинским центрам, 100% (n=32)

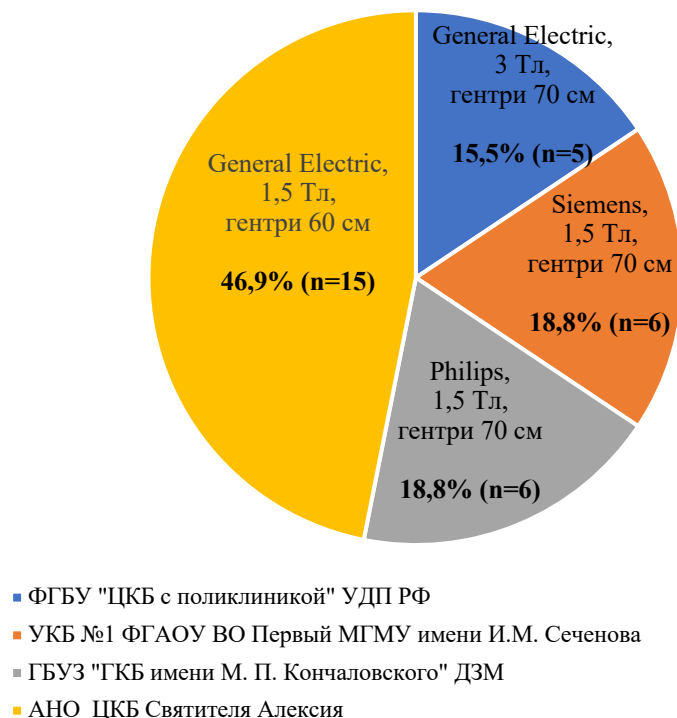


Рисунок 2 — Диаграмма распределения здоровых добровольцев по медицинским центрам в зависимости от производителя, ширины апертуры гентри и напряженности магнитного поля МР-томографа

На втором этапе с 2023 по 2025 гг. в АНО ЦКБ Святителя Алексия было обследовано 98 пациентов с подозрением на повреждение ПКС или трансплантата ПКС.

В группе пациентов с подозрением на повреждение ПКС было 60 человек в возрасте от 18 до 59 лет. Из них 35 (58,3%) мужчин, 25 (41,7%) женщин. Средний возраст пациентов составил 34,6 года.

Распределение пациентов по возрасту и полу предоставлено в Таблице 1.

В группе пациентов с подозрением на повреждение трансплантата после пластики ПКС было 38 человек в возрасте от 18 до 54 лет. Из них 22 (57,9%) мужчины, 16 (42,1%) женщин. Средний возраст пациентов составил 34,5 года. Распределение пациентов по возрасту и полу предоставлено в Таблице 2.

Таблица 1 – Соотношение по возрасту и полу в группе пациентов с подозрением на повреждение ПКС

Возраст/ пол	Группа пациентов с подозрением на повреждение ПКС					
	Мужчины		Женщины		Всего	
	Абс.	%	Абс.	%	Абс.	%
18–20 лет	3	5,0	4	6,7	7	11,7
21–30 лет	12	20,0	6	10,0	18	30,0
31–40 лет	7	11,7	6	10,0	13	21,7
41 год и старше	13	21,6	9	15,0	22	36,6
Всего	35	58,3	25	41,7	60	100%

Таблица 2 – Соотношение по возрасту и полу в группе пациентов с подозрением на повреждение трансплантата ПКС

Возраст/ пол	Группа пациентов с подозрением на повреждение трансплантата ПКС					
	Мужчины		Женщины		Всего	
	Абс.	%	Абс.	%	Абс.	%
18–20 лет	2	5,3	2	5,3	4	10,6
21–30 лет	8	21,0	0	0	8	21,1
31–40 лет	8	21,0	9	23,7	17	44,7
41 год и старше	4	10,6	5	13,1	9	23,6
Всего	22	57,9	16	42,1	38	100

Клинико-лучевое обследование всех пациентов (n=98, 100%) проходило по следующему плану: сбор жалоб и анамнеза с заполнением анкет; осмотр врача-травматолога с клиническим тестированием на целостность ПКС или трансплантата; мультимодальная лучевая диагностика коленного сустава.

Все МР-исследования были проведены на МР-томографе 1,5 Тл (GE HealthCare, Чикаго, США). Последовательно выполняли стандартную МРТ коленного сустава и фМРТ. МР-исследования проводили в среднем через 1 месяц после травмы коленного сустава. У пациентов после пластики ПКС исследования проводили в среднем через 2 года после первичной операции по реконструкции связки.

После клинико-лучевого обследования всем пациентам (n=98, 100%) была выполнена артроскопия. Артроскопическая операция рутинно выполнялась из 3-х доступов (2 переднемедиальных и 1 переднелатерального) с проведением фото- и видеофиксации выявленных повреждений. Результаты МРТ и фМРТ сравнивались с результатами артроскопии.

Для пациентов с повреждением ПКС средний интервал времени между МРТ/фМРТ и последующей артроскопией составил 50 дней, для пациентов с повреждением трансплантата ПКС – 55 дней.

На основе полученных данных из группы здоровых добровольцев (n=32) проводилась разработка методики и протокола фМРТ на разных типах томографов, изучение анатомии и биомеханики ПКС в движении.

На основе полученных данных из групп пациентов с подозрением на повреждение ПКС (n=60) и пациентов с подозрением на повреждение трансплантата ПКС (n=38) проводили изучение и разработку семиотики повреждения ПКС и трансплантата в движении. Расчет и сравнение диагностической эффективности, прогностической ценности, достоверности диагностики групп пациентов с повреждением ПКС и трансплантата ПКС методами МРТ и фМРТ проводили на основе артроскопической верификации, исходя из изменений, зафиксированных врачами-травматологами в протоколах операций.

2.2. Методы обследования здоровых добровольцев и пациентов с подозрением на повреждение передней крестообразной связки или трансплантата

2.2.1. Клинические методы

Клинические методы обследования состояли из сбора анамнеза, жалоб и физикального осмотра коленного сустава врачом-травматологом с выполнением тестов на переднезаднюю и ротационную стабильность.

При опросе здоровых добровольцев убеждались в отсутствии травм и операций на коленном суставе в анамнезе, а также жалоб, характерных для разрыва ПКС. При опросе пациентов с подозрением на повреждение ПКС или трансплантата подробно оценивали все имеющиеся жалобы, связанные с заинтересованными суставом, выясняли механизм травмы и факторы,

спровоцировавшие травму, уточняли историю операций и другого лечения коленного сустава в прошлом.

Среди здоровых добровольцев отрицали факт травмы и любые жалобы со стороны коленного сустава все 100% (n = 32) обследованных.

Среди обследованных с подозрением на разрыв ПКС (n = 60, 100%) точно указывали на факт травмы 76,67% (n = 46) пациентов, при этом бесконтактный характер травмы отмечался у 58,34% (n = 35) пациентов, прямое воздействие травмирующей силы на коленный сустав – у 18,33% (n = 11) пациентов. У 23,33% (n = 14) пациентов не было явного события, связанного с травмой коленного сустава (Рисунок 3).

Механизм повреждения ПКС

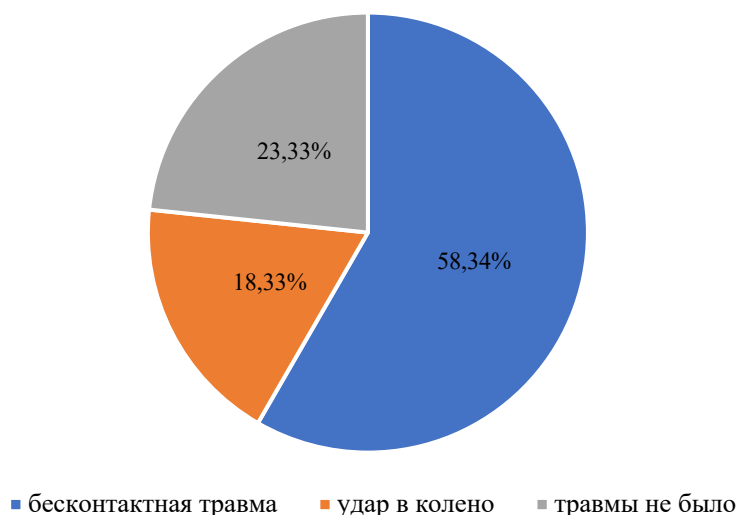


Рисунок 3 – Диаграмма распределения пациентов в зависимости от механизма повреждения ПКС

Из жалоб у пациентов с подозрением на разрыв ПКС самым частым оказалась боль в колене при движении, которая встречалась у 78,3% (n = 47) пациентов. Чувство нестабильности в суставе отмечалось у 66,7% (n = 40) пациентов, щелчки в суставе – у 53,3% (n = 32) пациентов, припухлость сустава – у 41,7% (n = 25) пациентов. У 45,0% (n = 27) пациентов отмечалось ограничение движения в суставе. Реже всего пациенты жаловались на боль в коленном суставе в покое и заклинивание – такие симптомы встречались у 31,7% (n = 19) пациентов.

Распределение частоты встречаемости симптомов пациентов с подозрением на повреждение ПКС представлено на Рисунке 4.

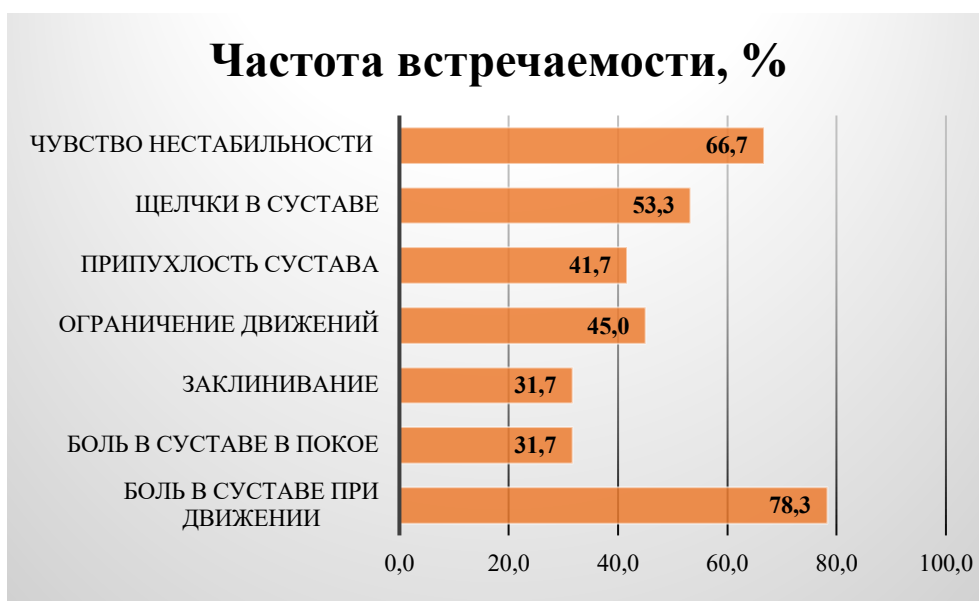


Рисунок 4 – Диаграмма распределения частоты встречаемости жалоб у пациентов с подозрением на повреждение ПКС

В отличие от этого, у пациентов с подозрением на повреждение трансплантата ПКС ($n = 38$, 100%) точно указывали на факт повторной травмы только 50,0% ($n = 19$), у другой половины 50,0% ($n = 19$) пациентов не было манифестной травмы коленного сустава.

Из жалоб у пациентов с подозрением на повреждение трансплантата ПКС ведущими являлись: боль в суставе у 63,2% ($n = 24$), чувство нестабильности у 52,6% ($n = 20$), и ограничение движений / «скованность» в суставе у 52,6% ($n = 20$).

Распределение частоты встречаемости жалоб пациентов с подозрением на повреждение трансплантата ПКС представлено на Рисунке 5.

Ортопедический осмотр проводили с обязательным выполнением трех клинических тестов для диагностики повреждения ПКС до и после пластики. Последовательно выполняли тест ПВЯ, тест Лахмана, тест pivot shift.



Рисунок 5 – Диаграмма распределения частоты встречаемости жалоб у пациентов с подозрением на повреждение трансплантата ПКС

Тест ПВЯ производили в положении пациента лежа на спине с согнутым до 90° коленом и зафиксированной стопой. Врач-травматолог обхватывал голень обеими руками у сустава и тянул ее вперед на себя, оценивая смещение большеберцовой кости. Величина передней тракции большеберцовой кости определяла отрицательный или положительный результат теста и степень повреждения ПКС или трансплантата.

Тест Лахмана выполняли в положении пациента лежа на спине с согнутым под углом в $20\text{--}30^\circ$ коленом. Врач-травматолог фиксировал бедро одной рукой, а другой плавно тянул голень вперед. Повышенное смещение голени (более 5 мм) или «мягкую» остановку трактовали как положительный результат теста и признак повреждения ПКС.

Тест pivot shift производили в положении пациента лежа на спине. Врач-травматолог создавал вальгусное напряжение (отклонение голени внутрь) и внутреннюю ротацию голени, одновременно сгибая колено из полного разгибания. Наличие щелчка или вправления подвывихнутой большеберцовой кости трактовали как положительный результат теста

Заключительный клинический вердикт о вероятности и степени повреждения ПКС или трансплантата делали на основании сопоставления результатов всех

3-х тестов, информация о которых была резюмирована в протоколах клинического осмотра [92, 241].

Результаты клинических тестов интерпретировали как выражено положительные (+++), умеренно положительные (++), слабopоложительные (+), сомнительные (\pm) и отрицательные (-).

В данное исследование включали здоровых добровольцев с отрицательными (-) результатами всех клинических тестов и пациентов с положительными (+ или ++) или сомнительными (\pm) результатами клинических тестов.

2.2.2. Методы лучевой диагностики

Рентгенография. РГ травмированного коленного сустава была выполнена всем пациентам ($n = 98, 100\%$).

Рентгенологическое исследование проводили на аппарате Axiom Luminos dRF (Siemens, Германия) в боковой и прямой задней проекциях. Стандартная укладка при боковой проекции: пациент лежит на боку (на стороне исследования), колено слегка согнуто (около $20-30^\circ$) для лучшей визуализации суставной щели; под противоположную ногу подложена опора. Стандартная укладка при прямой задней проекции: пациент лежит на спине, нога полностью выпрямлена; направление центрального луча на 1–2 см книзу от нижнего надколенникового края. Исследование выполняли без предварительной подготовки.

Технические параметры РГ коленного сустава в проведенном исследовании: напряжение 60–75 кВ с использованием отсеивающей решетки, фокусное расстояние 115 см, сила тока и время 30–45 мАс; время экспозиции 2–3 с, лучевая нагрузка менее 0,1 мЗв.

По полученным рентгенограммам в первую очередь проводили общую оценку костно-травматических изменений: наличие переломов бедренной, большеберцовой и малоберцовой костей, надколенника, наличие костных фрагментов и инородных тел в полости сустава. Во вторую очередь оценивали косвенные признаки, указывающие на разрыв ПКС, такие как перелом

межмышцелкового возвышения, импрессионные переломы мышцелков бедренных и большеберцовых костей («целующаяся импрессия»), перелом Сегонда, отрывной перелом проксимального отдела малоберцовой кости (дугообразный перелом), признак латеральной бедренной вырезки (костно-хрящевая импрессия), переднее смещение большеберцовой кости. Фиксировали наличие или отсутствие суставного выпота в коленном суставе.

У пациентов с подозрением на повреждение трансплантата ПКС по данным РГ сначала оценивали состояние фиксаторов трансплантата ПКС: интерферентных винтов, экзокортикальных фиксаторов таких как Endobutton (Smith & Nephew, Великобритания) и Rigitloop (Mitek, США), положение и ширину костных каналов. Далее происходила оценка костной структуры на предмет переломов и авульсии костей. Также отмечали признаки посттравматического ОА, такие как сужение суставной щели, деформация суставных поверхностей, наличие краевых остеофитов.

Необходимо отметить, что РГ не входила в дизайн настоящего исследования и выполнялась согласно плану подготовки к артроскопии.

Магнитно-резонансная томография. МРТ коленного сустава у всех пациентов (n = 98, 100%) для выявления повреждения ПКС или ее трансплантата проводили на аппарате Signa Creator 1,5 Тл (GE HealthCare, Чикаго, США) с шириной апертуры гентри 60 см.

Метод не требовал специальной подготовки.

Исследование выполняли в статическом варианте, в стандартной укладке (ногами вперед, лежа на спине, с выпрямленной ногой и разогнутым коленом) с использованием гибкой многоканальной катушки для суставов. При необходимости дополнительная фиксация нижней конечности от случайных движений осуществлялась при помощи специальных мешочков с песком.

Согласно протоколу МР-безопасности до размещения в томографе с пациента снимали все ферромагнитные металлические предметы, в том числе обеспечивающие иммобилизацию травмированного колена (ортезы).

Разметка поля обзора на топограмме происходила по центральным отделам сустава, ориентируясь на проекцию суставной щели.

Протокол МРТ с указанием ИП, плоскостей сканирования и других технических параметров представлен в Таблице 3.

Таблица 3 – Протокол МРТ коленного сустава

Параметры ИП	TR, мс	TE, мс	Толщина среза, мм	Матрица	Поле зрения	Межсрезовый интервал	Количество повторений
PD FS Axial	2000–4000	15–30	3–3,5	324x256	150–160	0–10%	2
PD FS Coronal	3000–5000	15–30	3–3,5	324x256	160–170	0–10%	2
T1 Coronal	400–600	10–20	3–3,5	324x224	160–170	0–10%	2
PD FS Sagittal	3000–5000	15–30	3–3,5	324x324	160–170	0–10%	2
T2 Sagittal	5000–6000	80–100	3–3,5	324x256	160–170	0–10%	2
Дополнительно по оси ПКС							
T2 Oblique Sagittal	3000–4000	80–100	2–2,5	256x256	140–150	0	4
PD FS Oblique Coronal	3000–4000	15–20	2–2,5	256x256	140–150	0	4
Примечание: TR – Time of Repetition, время повторения; TE – Time of Echo, время эха							

МР-томографию коленного сустава выполняли в 3-х плоскостях: фронтальной, сагиттальной и аксиальной, ориентированных вдоль анатомических осей коленного сустава. Использовались T2-, T1-взвешенные и взвешенные по PD ИП с применением спектрального жироподавления (Fat Sat для МР-томографа GE).

В случае значимых артефактов магнитной восприимчивости от фиксаторов трансплантата при проведении МРТ после пластики ПКС вместо спектрального режима жироподавления использовали Short Tau Inversion Recovery, также применяли специальные последовательности для уменьшения артефактов от металла (MAVRIC для МР-томографа GE).

При необходимости стандартный МР-протокол дополняли ИП в кософронтальной и кососагиттальной плоскости, ориентированными по ходу ПКС и с толщиной среза 2–2,5 мм для улучшения визуализации ее структуры и отдельно ПМ и ЗЛ пучков (Рисунок 6).

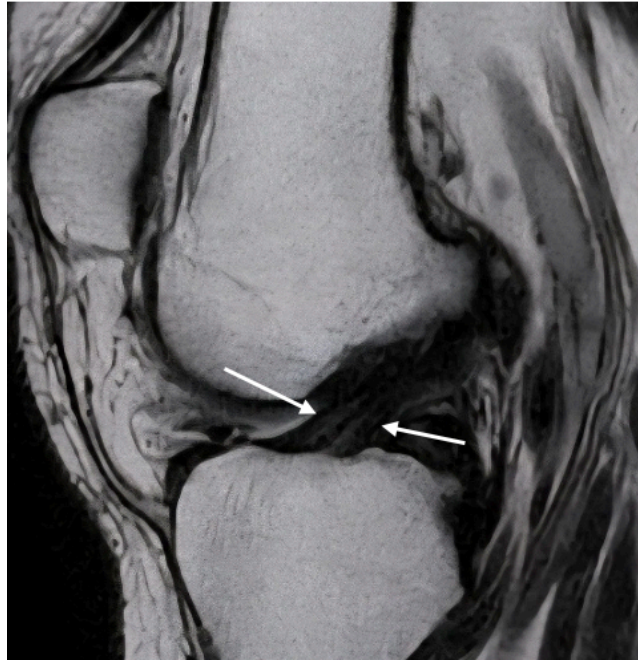


Рисунок 6 – МРТ коленного сустава, выполненное в косоагиттальной плоскости по оси ПКС, в режиме T2-ВИ с толщиной среза 2 мм. Отчетливо дифференцируются отдельно расположенные ПМ и ЗЛ пучки ПКС

По МР-томограммам оценивали следующие признаки, напрямую или косвенно ассоциированные с повреждением ПКС или трансплантата:

- целостность и непрерывный ход ПКС и трансплантата (Рисунок 7А);
- наличие визуализации волокон ПКС или трансплантата во всех плоскостях сканирования;
- контуры и ориентация волокон ПКС и трансплантата с измерением угла;
- интенсивность МР-сигнала от связки и трансплантата;
- наличие отека/контузии костного мозга латерального мыщелка бедренной кости и задних отделов плато мыщелков большеберцовых костей («целующиеся» контузии);
- импрессионные переломы/авульсия задних краев медиального и тибияльного плато (Рисунок 7Б, Рисунок 7В);
- гемартроз;
- передний подвывих большеберцовой кости;
- гиперангуляция задней крестообразной связки;
- наличие разрывов менисков, ЗКС и коллатеральных связок;

- положение и ширина костных каналов в бедренной и большеберцовой костях;
- состояние крыши межмыщелковой вырезки и межмыщелкового возвышения;
- наличие атрофиброза;
- положение интерферентных винтов и других фиксаторов трансплантата.

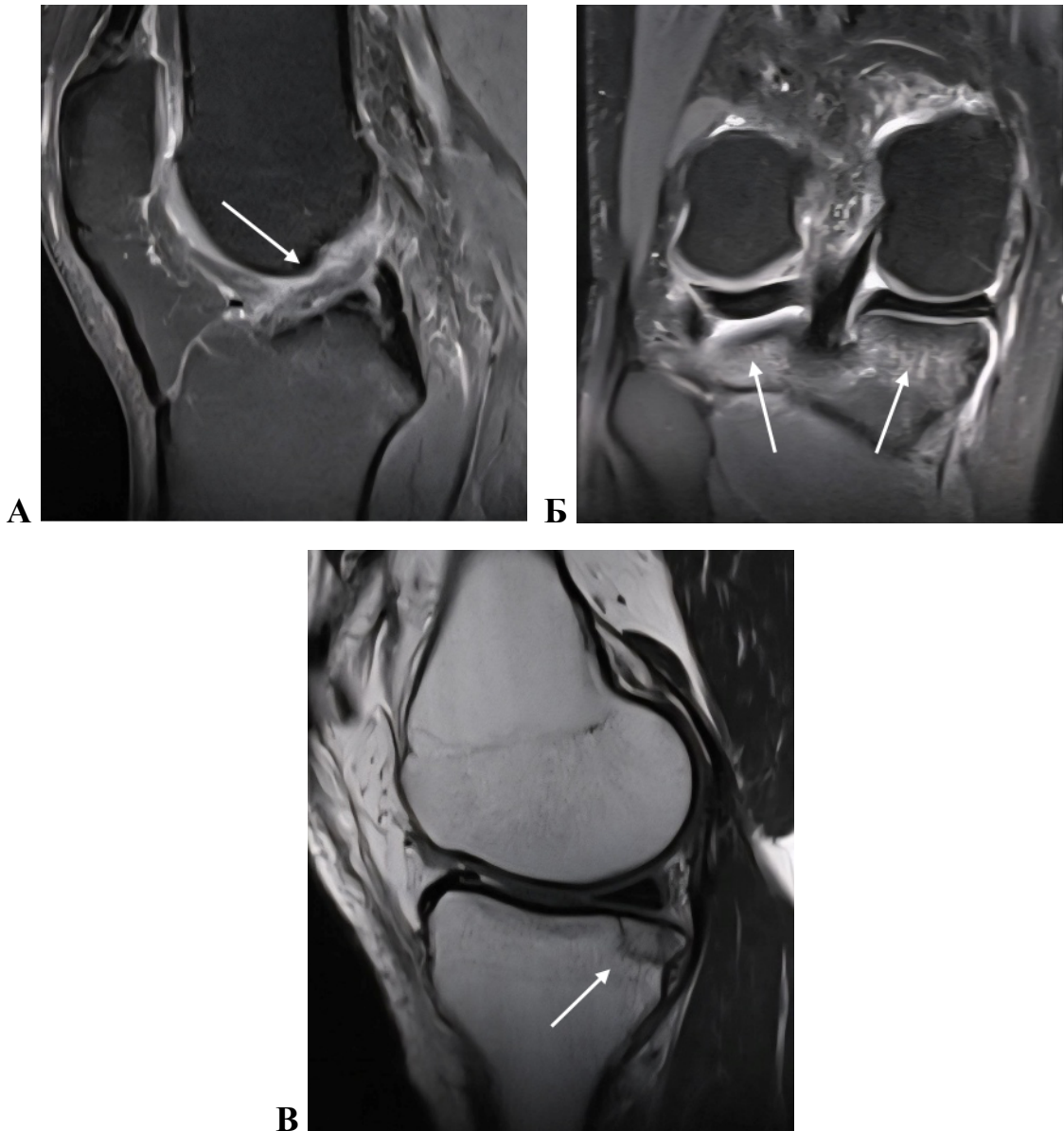


Рисунок 7 – МРТ коленного сустава в сагиттальной плоскости в режиме PD FS (А), во фронтальной плоскости в режиме PD FS (Б), в сагиттальной плоскости в режиме T2 (В). Стрелками показаны: разволокненная и отечная ПКС с нарушением хода волокон (А), контузия костного мозга и минимальная импрессия задних краев мыщелков большеберцовых костей (Б), краевой перелом заднемедиального края плато большеберцовой кости (В)

Функциональная магнитно-резонансная томография. Первоначально на 32 здоровых добровольцах разрабатывали методику проведения фМРТ. Исходя из задачи создания универсального метода функциональной диагностики коленного сустава на МРТ, исследования проводили на 4-х разных клинических базах. При этом были использованы МР-томографы 3-х наиболее распространенных фирм-производителей в России на сегодняшний день (Siemens, Германия; Philips, Нидерланды; General Electric, США) с напряженностью магнитного поля как 1,5 Тл, так и 3 Тл, с шириной апертуры гентри 60 см и 70 см.

Методику фМРТ на всех томографах проводили следующим образом:

1. Здорового добровольца укладывали в МР-томограф в положении лежа на животе, ногами вперед, с использованием многоканальной гибкой радиочастотной катушки для исследования суставов. Катушку фиксировали сбоку от коленного сустава, вдоль его медиальной и латеральной поверхности. Преимуществом являлось использование катушек с большим количеством каналов для повышения качества получаемых изображений. Важным условием являлось отсутствие поперечной фиксации между кольцами по верхнему краю катушек для свободного сгибания в коленном суставе (Рисунок 8).

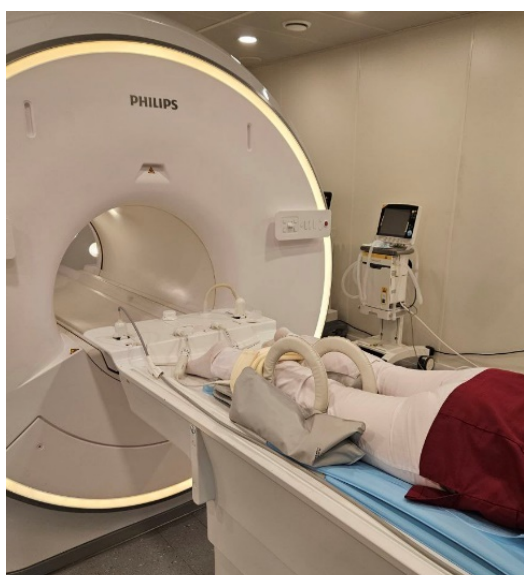


Рисунок 8 – Фотография укладки пациента на столе томографа при выполнении фМРТ коленного сустава. Укладка пациента лежа на животе, ногами вперед. Гибкие катушки – сбоку от сустава, ориентированы вертикально. Фиксация колец катушки – вдоль стола томографа и сбоку, сверху – нет фиксации для свободного движения колена

2. Проводили стандартный локалайзер коленного сустава.
3. Проводили дополнительный прицельный локалайзер коленного сустава вдоль центральных структур (крестообразных связок).
4. Здорового добровольца инструктировали о необходимости с началом сканирования томографа сгибать и разгибать колено (сгибание происходит до верхнего края гентри томографа). Время сканирования в зависимости от производителя и настроек томографа составляло от 12 до 16 секунд. В среднем за это время пациент делал 2–3 цикла «сгибание-разгибание» в коленном суставе. Протокол фМРТ представлен в Таблице 4.

Таблица 4 – Протокол фМРТ коленного сустава

ИП	Короткое одноимпульсное ультрабыстрое спиновое эхо с половинным-Фурье преобразованием SS-FSE/SS-TSE/HASTE
Толщина среза	3–5 мм
TR	2000 мс
TE	min
Время сбора данных	12–16 с
Контраст изображения	PD
Количество фаз (повторений)	8–15
Параллельный сбор данных (ASSET/SENSE/Acceleration)	2–8 (для 4–32-канальных катушек соответственно)
Количество срезов	1–4
Плоскость исследования	Косо-сагиттальная по оси ПКС

5. Для выполнения функциональной МРТ выполняли кососагиттальные срезы по плоскости ПКС / трансплантата ПКС во время свободного движения в коленном суставе (Рисунок 9).
6. Протокол исследования при необходимости дополняли псеводинамическим режимом, то есть выполнением стандартных ИП с фиксацией коленного сустава под определенным углом сгибания. Время исследования в положении сгибания было идентично стандартной укладке и составляло 3–4,5 минуты в зависимости от напряженности магнитного поля томографа, канальности системы/катушек и выбранного способа жироподавления (Рисунок 10).



Рисунок 9 – фМРТ. Топограммы в аксиальной (А) и фронтальной (Б) плоскостях с планированием вдоль оси ПКС (желтая линия). Угол наклона подбирается индивидуально и может варьировать. На представленной топограмме в аксиальной плоскости (А) угол меньше, чем при планировании кососагиттальной плоскости по ПКС на стандартном МРТ из-за смещения плоскости связки при сгибании. В: фМРТ в кососагиттальной плоскости с углом сгибания коленного сустава около 55° . ПКС отчетливо прослеживается на всем протяжении с формированием физиологического изгиба кпереди



Рисунок 10 – фМРТ. МРТ коленного сустава в положении сгибания в сагиттальной плоскости в режиме PD FS (псеводинамический режим). Время сканирования составило 3,5 минуты. Укладка пациента в положении лежа на животе, ногами вперед, колено находится в положении сгибания под углом 50° и фиксировано в этой позиции. Стрелкой указана неизменная ПКС с гипоинтенсивным МР-сигналом и физиологическим плавным изгибом кпереди. Четко дифференцируются волокна связки.

Для выполнения МРТ в псеводинамическом режиме в положении сгибания в коленном суставе использовали дополнительные фиксирующие элементы – мешочки с песком, подставки, ортезы, элементы других катушек, доступные в кабинете МРТ. Это позволяло придать коленному суставу необходимый угол сгибания и обеспечить проведение исследования в этом положении без напряжения ноги, в комфортных условиях (Рисунок 11).

7. Стандартная МРТ коленного сустава в статическом режиме (нога разогнута в коленном суставе, движения в суставе отсутствуют) может быть выполнена в положении лежа на животе как до, так и после фМРТ в рамках одного исследования и не требует переукладки на спину. В настройках томографа необходимо правильно указать положение обследуемого для исключения инверсии изображений. МР-томограммы ПКС в положении лежа на животе были идентичны таковым в положении лежа на спине (Рисунок 12).



Рисунок 11 – фМРТ. Фотография укладки коленного сустава в положении сгибания для выполнения фМРТ в псевдодинамическом режиме. Укладка в положении лежа на животе, ногами вперед. Использованы мешочки с песком и дополнительная немагнитная подставка для устойчивого сгибания в суставе около 45–50° и подходящее для стандартных последовательностей МРТ коленного сустава – T2, T2, PD FatSat (SPIR/SPAIR/ASPIR)



А



Б

Рисунок 12 – МРТ в положении на спине (А) и на животе (Б). МРТ в сагиттальной плоскости в режиме протонной плоскости с жироподавлением (PD FS). Центральные отделы коленного сустава идентичны, стрелками показана интактная ПКС

После отработки методики все пациенты ($n = 98$, 100%) с подозрением на повреждение ПКС или трансплантата ПКС, включенные в настоящее исследование, были обследованы с помощью фМРТ.

Все исследования проводились в АНО ЦКБ Святителя Алексея на аппарате Signa Creator 1,5 Тл (GE HealthCare, Чикаго, США) с шириной апертуры гентри 60 см.

Далее пациента информировали о ходе диагностической процедуры и необходимости по команде сотрудника отделения выполнить необходимые движения в коленном суставе. Связь с пациентом осуществлялась стандартно через встроенную двустороннюю систему громкой связи, объединяющую процедурную и пультовую. Так как фМРТ предполагает свободное движение коленного сустава в гентри, до начала томографирования под контролем врача проводилось несколько тренировочных циклов сгибания и разгибания в исследуемом коленном суставе для обучения (Рисунок 13).

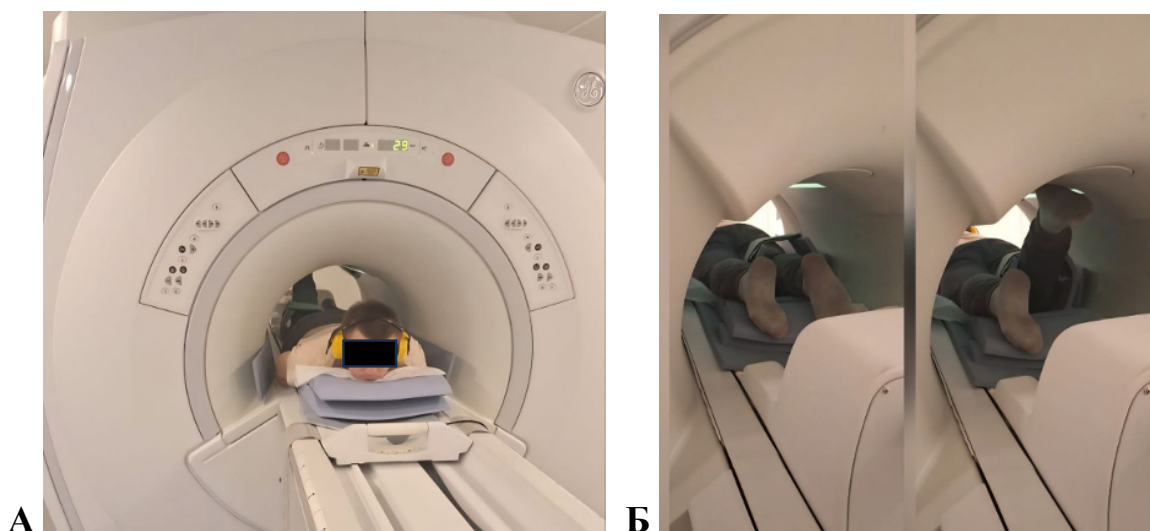


Рисунок 13 – фМРТ, фотографии. Пример правильного положения пациента в гентри (А) и свободных движений в коленном суставе (Б) при выполнении фМРТ. Крыша гентри является естественным ограничителем объема движений в суставе

Протокол исследования фМРТ, по которому были обследованы все пациенты, соответствовал ранее разработанному протоколу для здоровых добровольцев, представленному в Таблице 4 [43].

При получении функциональных данных отдельное внимание уделялось построению косо-сагиттальной плоскости по оси ПКС или трансплантата ПКС. Из-за того, что коленный сустав находился в свободном движении и геометрия пучков ПКС и волокон трансплантата менялась, могло требоваться от 1 до 5 повторений для точной визуализации ПКС или трансплантата в движении.

По полученным данным фМРТ оценивались следующие параметры:

- появление дефектов, нарушение непрерывности хода волокон ПКС или трансплантата в движении;
- нарушение фаз изометрического сокращения и расслабления 2 пучков связки или сухожильных волокон трансплантата в движении;
- наличие потери ПКС или трансплантатом физиологических изгибов кзади при разгибании и кпереди при сгибании (Рисунок 14);
- передний подвывих большеберцовой кости при возврате сустава в положение разгибания;
- признаки импинджмента или нестабильности трансплантата в движении;
- ограничение или увеличение объема движений в коленном суставе;
- нарушение артикуляции бедренной и большеберцовой костей, изменения нормальной биомеханики центральных отделов сустава.

Просмотр данных фМРТ был возможен на всех современных программах для просмотра DICOM-файлов с использованием режима кино. Для анализа изображений применяли как режим реального времени, так и покадровое уменьшение скорости полученных фМРТ-томограмм до 4–10 кадров в секунду, что облегчало оценку кинематики сустава. В случае детекции патологии, зону интереса анализировали покадрово с помощью обычных инструментов для анализа МР-изображений.

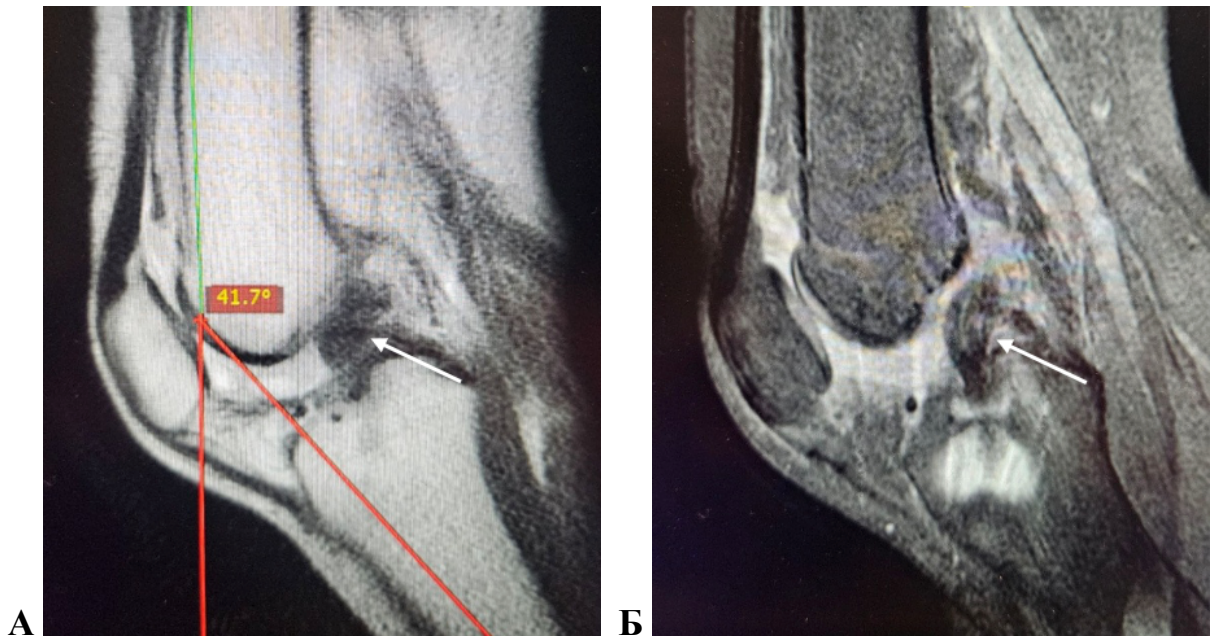


Рисунок 14 – фМРТ. Функциональная МРТ коленного сустава в кососагиттальной плоскости, ориентированной по трансплантату ПКС. Стрелкой показан трансплантат ПКС в положении сгибания на $41,7^\circ$ в движении в реальном времени (А) и псеводинамическом режиме (Б). Отмечается физиологический изгиб трансплантата ПКС кпереди как у нативной ПКС – признак анатомически выполненной пластики ПКС с правильно выбранной позицией каналов в местах футпринтов бедренной и большеберцовых костей

2.2.3. Артроскопическая оценка патологии

После проведения клиничко-лучевого обследования всем пациентам была выполнена артроскопия.

Пластика ПКС была выполнена 32 (53,3%) пациентам с подозрением на разрыв ПКС, у 3 (5%) пациентов была выполнена реконструкция только ЗЛ пучка.

В группе пациентов с подозрением на повреждение трансплантата повторная пластика ПКС была выполнена у 15 (39,5%) пациентов.

В обязательную подготовку пациентов на догоспитальном этапе входили следующие лабораторные анализы: клинический анализ крови с определением скорости оседания эритроцитов, общий анализ мочи, биохимический анализ крови, коагулограмма, группа крови и резус-фактор, анализ на инфекции (вирус иммунодефицита человека, сифилис, гепатиты В и С) со сроком годности 1 месяц,

мазок на коронавирусную инфекцию. Также необходимо было пройти флюоро- или рентгенографию грудной клетки, электрокардиографию с расшифровкой, получить консультацию терапевта.

В ходе артроскопической операции оценивали целостность ПМ и ЗЛ пучков ПКС или трансплантата ПКС, наличие артрофиброза в суставе (в том числе локализованного по типу «циклоп»-синдрома), миграции фиксирующих элементов, синовиальных кист по ходу трансплантата и в костных каналах, остеофитов. Также оценивали состояние ЗКС, менисков, степень хондромалиции суставного хряща мыщелков бедренной и большеберцовой костей по шкале Outerbridge (1961), наличие суставного выпота.

2.2.4. Статистическая обработка данных

Итоговые заключения о состоянии ПКС и трансплантата ПКС для методов МРТ, фМРТ и артроскопии были систематизированы и импортированы в таблицы для дальнейшего анализа.

Для статистической обработки данных использовали программное обеспечение: SPSS (SPSS Statistics, IBM, США), MedCalc (MedCalc Software Ltd, Бельгия) и Microsoft Office Excel 2019 (Microsoft, США).

Анализ полученных данных был проведен с помощью методов дескриптивной, вариационной, математической статистики, а также регрессионного и корреляционного анализа.

Диагностическую эффективность МРТ и фМРТ в диссертационной работе определяли на основании ключевых показателей прикладной медицинской статистики, полученных при обработке результатов: чувствительности (S_n), специфичности (S_p), точности (A_c).

Использовали классические формулы для расчета показателей:

$$S_n = TP / TP + FN;$$

$$S_p = TN / FP + TN;$$

$$A_c = TP + TN / TP + FN + FP + TN,$$

где TP – количество истинно положительных результатов; TN – количество истинно отрицательных результатов; FP – количество ложноположительных результатов; FN – количество ложноотрицательных результатов.

Артроскопия являлась референсной методикой в данной научно-исследовательской работе: результаты всех МРТ и фМРТ исследований пациентов были верифицированы интраоперационно, с подтверждением окончательного диагноза в ходе лечебно-диагностической операции на коленном суставе.

Для оценки вероятности наличия или отсутствия повреждения ПКС/трансплантата ПКС у пациентов на основе результатов МРТ и фМРТ были рассчитаны показатели PPV и NPV результата по стандартным формулам:

$$PPV = TP / TP + FP;$$

$$NPV = TN / FN + TN.$$

Для каждой степени повреждения ПКС на основе полученных результатов чувствительности и специфичности для МРТ и фМРТ строили ROC-кривые для верификации наиболее эффективного метода-классификатора.

Помимо оценки степени повреждения ПКС, проводилась оценка достоверности диагноза для МРТ и фМРТ на основе 5-балльной шкалы со значениями: 1 – полностью неопределенный, 2 – малая вероятность, 3 – сомнительно, 4 – вероятно и 5 – очень вероятно. Уровни достоверности интерпретации оценивали для МРТ или фМРТ, а разницу в уровнях достоверности проверяли с помощью парного t-критерия.

Дополнительно определяли диагностическое согласие каждого из методов (МРТ и фМРТ) с артроскопией с помощью взвешенной капшы (k). Степень согласия интерпретировали по формуле: 0 – плохое, 0,01–0,20 – незначительное, 0,21–0,40 – удовлетворительное, 0,41–0,60 – умеренное, 0,61–0,80 – существенное, 0,81–1,00 – отличное согласие [222].

Таким образом, в представленном диссертационном исследовании была разработана новая методика исследования – фМРТ коленного сустава. Произведена оценка и сравнение диагностической эффективности, прогностической ценности,

достоверности МРТ и фМРТ в детекции повреждений ПКС как до, так и после пластики, а также определено диагностическое согласие с референс-методом – артроскопией.

ГЛАВА 3. РЕЗУЛЬТАТЫ СОБСТВЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Всего в данную научно-исследовательскую работу было включено 130 человек (100%), из них 32 здоровых добровольца и 98 пациентов.

В первой части данной главы приведены результаты обследования 32 здоровых добровольцев в ходе реализации задачи по разработке методики и протокола фМРТ. Во второй и третьей частях приведены результаты обследования 98 пациентов, из них 60 с подозрением на повреждение ПКС и 38 с подозрением на повреждение трансплантата ПКС. Согласно дизайну диссертационной работы, здоровым добровольцам ($n = 32$) была проведена фМРТ коленного сустава, всем пациентам ($n = 98$) была проведена МРТ и фМРТ коленного сустава, а также артроскопия.

3.1. Результаты функциональной магнитно-резонансной томографии коленного сустава здоровых добровольцев

На фМРТ ПКС была визуализирована у всех добровольцев ($n = 32$, 100%), принимавших участие в исследовании.

В ходе отработки методики фМРТ было установлено, что оптимальной последовательностью для визуализации ПКС является одноимпульсное (Single-shot, SS) ультрабыстрое спин-эхо (Ultrafast Spin Echo, Ultrafast SE), с помощью которой ПКС в движении была визуализирована у всех 100% ($n = 32$) здоровых добровольцев, тогда как последовательности на основе сбалансированной стационарной свободной прецессии (Steady-state Free Precession, SSFP) и сверхбыстрого градиентного эха (Ultrafast gradient echo, Ultrafast GRE) позволили визуализировать ПКС в 40,63% ($n = 13$) и 34,38% ($n = 11$) случаев.

В Таблице 5 представлены акронимы последовательностей, используемых при фМРТ коленного сустава у разных производителей МР-томографов с учетом адаптации к скелетно-мышечной системе.

Таблица 5 – Последовательности для фМРТ коленного сустава у разных производителей МР-томографов

Последовательности для фМРТ			
Название МР-томографа, страна производитель	SS Ultrafast SE	SSFP	Ultrafast GRE
General Electric, США	SS-FSE	FIESTA	FSPGR
Philips, Нидерланды	SSH-TSE	bFFE	TFE
Siemens, Германия	HASTE	TrueFISP	TurboFLASH
Программный пакет протоколов	брюшная полость, МР-холангио-панкреатография, кардиология	кардиология, малый таз	кардиология, плод
Примечание: SS-FSE (Single Shot Fast Spin Echo), SSH-TSE (Single Shot High-speed Turbo Spin Echo), HASTE (Half-Fourier Acquisition Single-shot Turbo spin-Echo) – одноимпульсные быстрые последовательности спинного эха с половинным Фурье-преобразованием; FIESTA – Fast Imaging Employing Steady-state Acquisition; bFFE – Balanced Fast Field Echo; TrueFISP – True Fast Imaging with Steady-state Precession; FSPGR – Fast Spoiled Gradient Recalled; TFE – Turbo Field Echo; TurboFLASH – Turbo Fast Low-Angle Shot			

На МРТ в режиме реального времени и псеводинамическом МРТ в положении сгибания динамический диапазон флексии-экстензии коленного сустава составил 50–65° на МР-томографе с апертурой гентри 60 см (n = 15) и 55–70° (n = 17) на МР-томографах с апертурой гентри 70 см.

Длительность проведения фМРТ коленного сустава в режиме реального времени занимала не более 5–10 минут с учетом инструктажа добровольца, дополнительные псеводинамические серии в положении сгибания соответствовали таковым при стандартной МРТ и составляли 3,0–4,5 минуты каждая. Между фМРТ на аппаратах 1,5 и 3 Тл не было статистически значимых различий в скорости и качестве полученных изображений ПКС в движении ($p < 0,05$).

фМРТ в псеводинамическом режиме позволила неинвазивно изучить на МРТ 2-пучковую анатомию ПКС в разных положениях сгибания: ПМ пучок мощнее, напряжен в позиции сгибания, в том время как ЗЛ расслаблен; при разгибании – наоборот, ЗЛ пучок напряжен, а ПМ – расслаблен. Эта взаимодополняющая функция пучков обеспечивает ПКС постоянное

натяжение в любую фазу сгибания и разгибания, что и определяет стабильность колена во всем объеме движений (Рисунки 15, 16) [143].

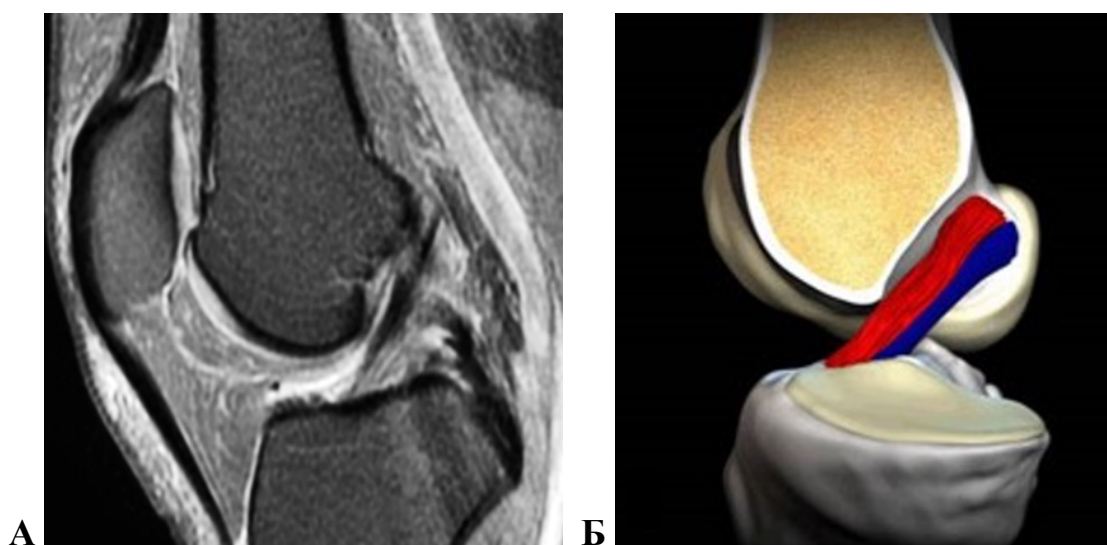


Рисунок 15 – МРТ. А: МРТ в сагиттальной плоскости в режиме PD FS в стандартной позиции колена; Б: 3D-графика [43]. В положении разгибания отмечается расслабление ПМ пучка (красный) и натяжение ЗЛ пучка (синий)

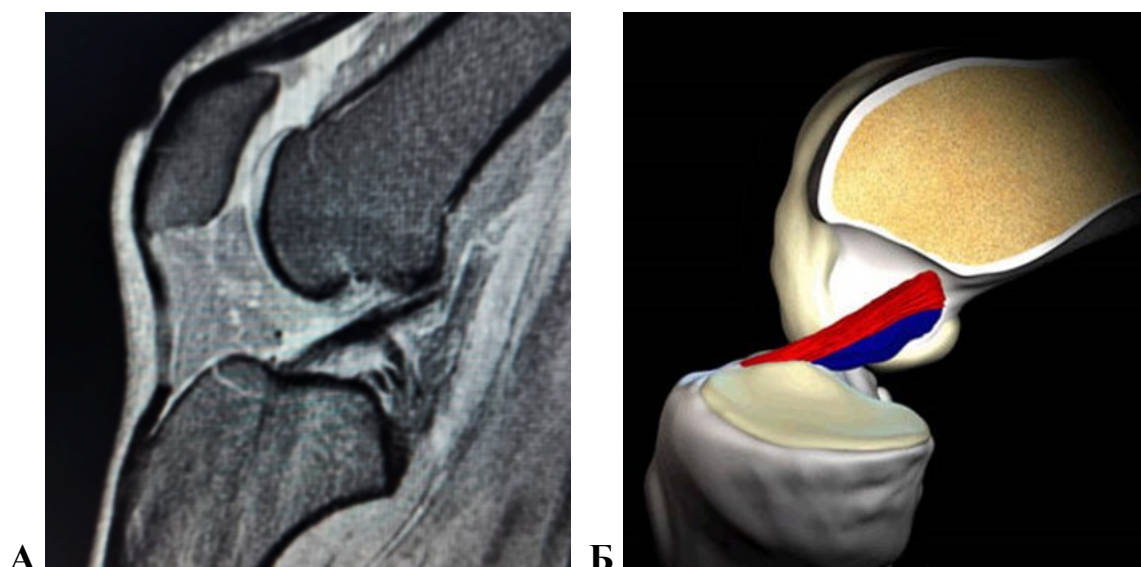


Рисунок 16 – фМРТ, псеводинамический режим. А: фМРТ в сагиттальной плоскости в режиме PD FS в положении сгибания колена на 55°; Б: 3D-графика [43]. В положении сгибания отмечается натяжение ПМ пучка (красный) и расслабление ЗЛ пучка (синий)

фМРТ в движении позволила неинвазивно изучить биомеханику ПКС на МРТ: при сгибании сустава происходит постепенное «выпрямление» ПКС, и при увеличении угла более 35–40° отмечается прогрессивно увеличивающийся

физиологический изгиб ПКС кпереди, что свидетельствует о ее целостности и нормальном натяжении. В положении сгибания также происходит физиологическое уплощение и утолщение нормальной неизменной ПКС с небольшой ротацией волокон. При разгибании сустава на фМРТ хорошо визуализируется момент ограничения большеберцовой кости от дальнейшего смещения кпереди, при этом оба пучка ПКС располагаются вдоль крыши бедренной вырезки в состоянии натяжения (Рисунок 17).



Рисунок 17 – фМРТ. фМРТ коленного сустава в кососагиттальной плоскости, ориентированной по ПКС. Стрелкой показана ПКС в положении разгибания (А), сгибания на 40° (Б) и сгибания на 60° (В). В режиме реального времени на МРТ в норме прослеживается: изменение геометрии волокон ПКС в разных положениях сгибания колена; уплощение и утолщение нормальной неизменной ПКС с небольшой ротацией волокон по мере увеличения сгибания; максимальное натяжение и ограничивающая функция ПКС в отношении большеберцовой кости при возврате сустава в положение разгибания

3.2. Результаты магнитно-резонансной томографии и функциональной магнитно-резонансной томографии коленного сустава у пациентов с подозрением на повреждение передней крестообразной связки

По результатам МРТ и фМРТ исследований подготавливали заключения, первоначально оценивая состояние ПКС, используя МРТ коленного сустава, а затем фМРТ.

Тяжесть повреждения ПКС оценивалась по 3-балльной шкале, то есть оценками 0, 1, 2 [228]. Степень 0 соответствовала нормальной, неповрежденной ПКС, степень 1 – частичный разрыв, степень 2 – полный разрыв. ПКС соответствовала норме при наличии низкой интенсивности сигнала во всех типах взвешенности, сохранении однородной структуры и достаточного натяжения с типичным ходом волокон. Гиперинтенсивный сигнал на PD ИП, отек, изменение толщины, разволокнение расценивались как частичный разрыв. Диагноз полного разрыва ПКС был выставлен при нарушении непрерывности хода, полнослойных дефектах, аномальном ходе, смещении волокон связки, ее резком удлинении и истончении. Использование непрямых признаков разрыва ПКС учитывалось при разграничении полных и частичных разрывов [228].

Для фМРТ были разработаны 4 новых, дополнительных признака разрыва ПКС: появление дефектов, нарушение непрерывности хода волокон связки в движении; нарушение фаз изометрического сокращения и расслабления 2 пучков связки в движении; утрата связкой физиологических изгибов кзади при разгибании и кпереди при сгибании; патологическое смещение переднего края большеберцовой кости кпереди относительно передней кортикальной пластинки бедренной кости при возврате сустава в положение разгибания (Рисунок 18).

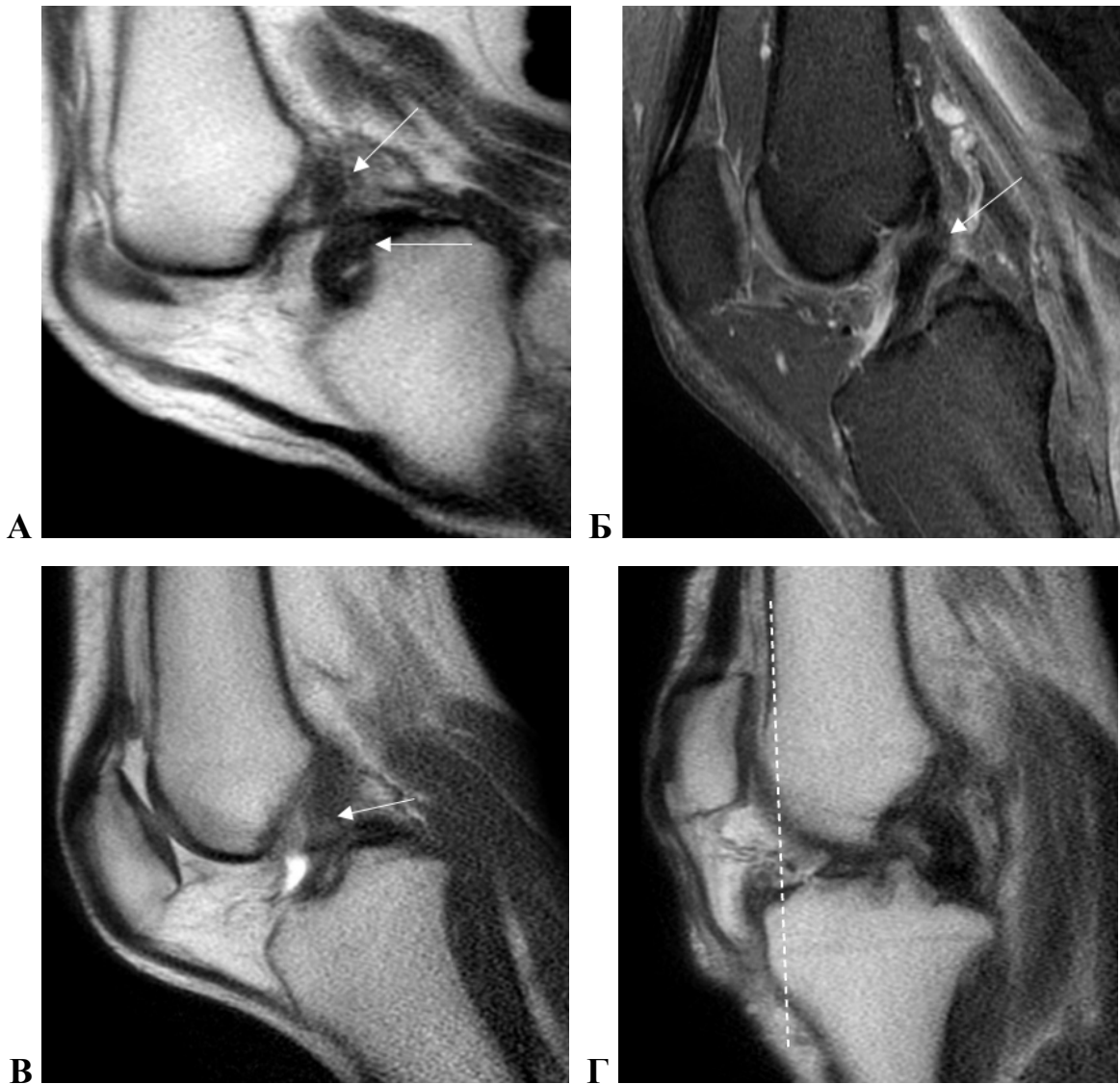


Рисунок 18 – Пациент Б., 27 лет. Диагноз: подозрение на разрыв ПКС. фМРТ. Продемонстрированы дополнительные признаки разрыва (А–Г). Стрелками показана ПКС. Пунктирная линия проведена через переднюю кортикальную пластинку бедренной кости.

А: на фМРТ в положении сгибания на 60° отмечается дефект ПКС в среднем сегменте с наличием двух культей проксимальнее и дистальнее зоны разрыва (стрелки). Б: на фМРТ в положении сгибания на 30° наблюдается потеря эластичности ПКС в средней порции при расслаблении ПМ и натяжении ЗЛ пучка с формированием локального утолщения связки и изменением МР-сигнала (стрелка). В: на фМРТ в положении сгибания на 45° отмечается отсутствие формирования физиологического изгиба связки кзади с ее «провисанием» (стрелка). Г: на фМРТ при возврате колена в положение разгибания отмечается патологическое переднее смещение большеберцовой кости относительно бедренной (пунктирная линия)

Помимо оценки степени повреждения ПКС проводили оценку достоверности диагноза для МРТ и фМРТ, а также оценку диагностического согласия между результатами МРТ, фМРТ и артроскопии.

Результаты МРТ и фМРТ сравнивали с отчетами артроскопии в качестве эталонного стандарта для определения состояния ПКС: артроскопическая диагностика выявила неповрежденную ПКС у 25 пациентов, частичные разрывы в 8 случаях, полные разрывы у 27 пациентов.

Чувствительность, специфичность и точность обнаружения разрывов ПКС на МРТ и фМРТ рассчитывали отдельно для каждой степени повреждения ПКС, согласно обозначенной в начале главы 3-балльной шкале. Значение $p < 0,01$ считалось статистически значимым.

Распределение пациентов по степени разрыва ПКС для МРТ и фМРТ с артроскопической верификацией суммированы в Таблице 6.

Таблица 6 – Распределение пациентов по степени разрыва ПКС на стандартной МРТ и фМРТ с артроскопической верификацией

Артроскопия	МРТ				фМРТ			
	0*	1*	2*	Всего	0*	1*	2*	Всего
Норма	16	8	1	25	23	2	0	25
Частичный разрыв	2	5	1	8	1	6	1	8
Полный разрыв	3	8	16	27	0	2	25	27
Всего	21	21	18	60	24	10	26	60

Примечание. * – степени разрыва ПКС: 0 – норма, 1 – частичный разрыв, 2 – полный разрыв. Цифровые значения в таблице – количество пациентов

Исследователь после просмотра фМРТ в 7 случаях уменьшил степень повреждения ПКС, в 10 случаях увеличил степень повреждения ПКС (всего 17 расхождений между заключениями МРТ и фМРТ). Все случаи пересмотра заключения после фМРТ в сторону повышения степени повреждения ПКС оказались верными и были подтверждены артроскопически, например, от нормы к частичному разрыву (Рисунок 19) или от частичного разрыва к полному (Рисунок 20).

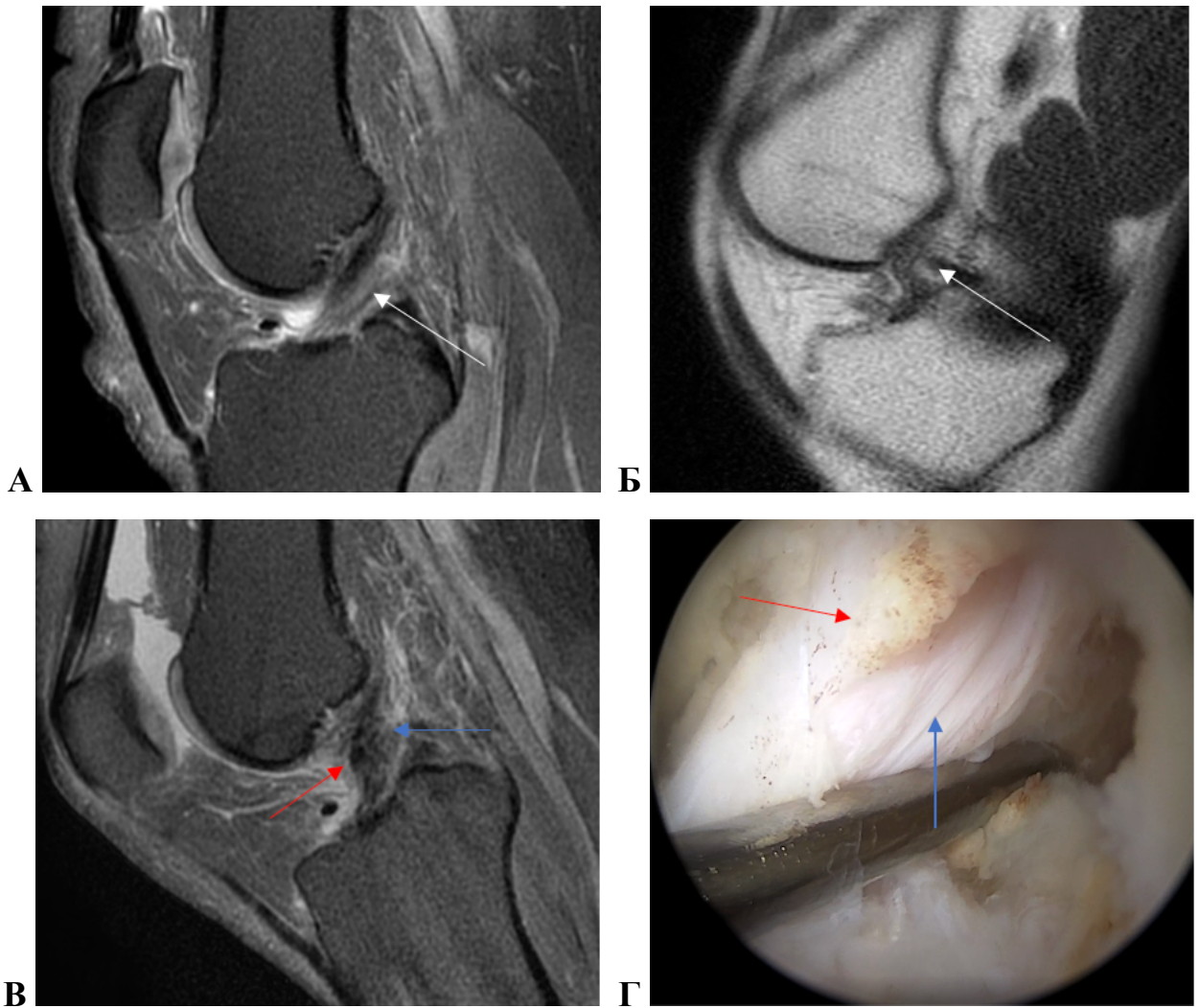


Рисунок 19 – Пациент П., 32 лет. Диагноз: подозрение на разрыв ПКС.
 МРТ (А), фМРТ (Б, В) и артроскопия (Г). Белыми стрелками показана ПКС, красными и синими – ее ПМ и ЗЛ пучки соответственно. На МРТ в сагиттальной плоскости ПКС выглядит неизменной, с нормальным натяжением, МР-сигналом и структурой, что трактовалось как норма (А). На фМРТ отмечается патологический S-образный изгиб связки при сгибании (Б) и нарушение прикрепления к бедренной кости ЗЛ пучка (В) – признаки частичного разрыва ПКС. Фотография во время артроскопии подтверждает разрыв ЗЛ пучка ПКС (Г)

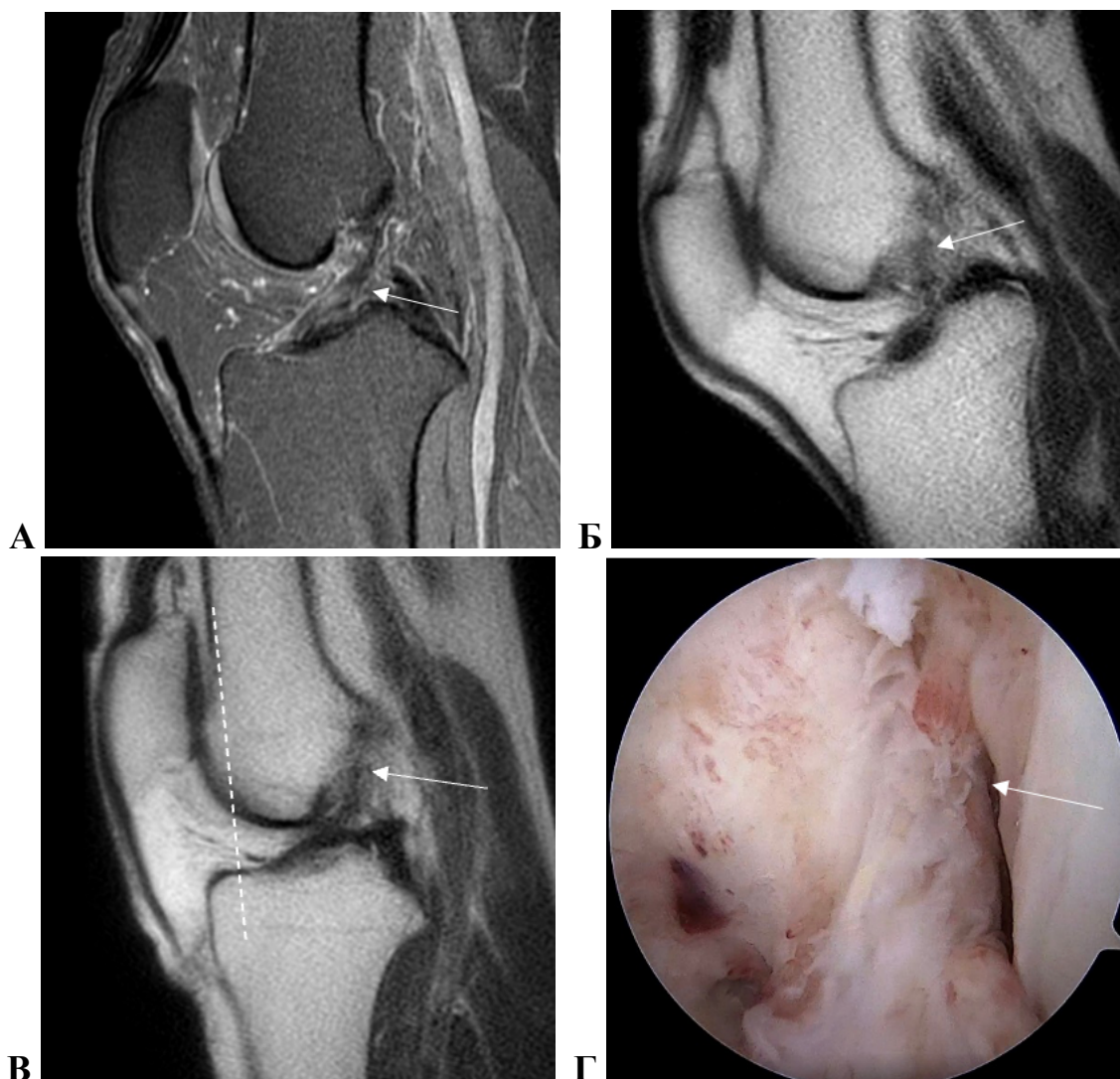


Рисунок 20 – Пациентка К., 26 лет. Диагноз: подозрение на разрыв ПКС. МРТ (А), фМРТ (Б, В) и артроскопия (Г). Стрелками показана ПКС. Пунктирная линия проведена через переднюю кортикальную пластинку бедренной кости. На МРТ в сагиттальной плоскости (А) ПКС неоднородной структуры за счет участков повышения МР-сигнала, умеренно истончена, пролеживается на всем протяжении – изменения расценены как частичный разрыв. На фМРТ в положении сгибания (Б) ПКС резко истончена, место ее прикрепления к бедренной кости не прослеживается. При возврате колена в положение разгибания (В) отмечается патологическое переднее смещение переднего края большеберцовой кости относительно кортикальной пластинки бедренной кости – изменения трактованы как полный разрыв ПКС. Артроскопическая фотография подтверждает полный разрыв ПКС с формированием культи (Г)

По результатам фМРТ существенно сократилось количество ошибочных заключений «частичный разрыв» по данным классической МРТ (на 11) и общее количество МР-диагнозов «частичный разрыв» ПКС по сравнению с классической МРТ (до 10 на фМРТ по сравнению с 21 на МРТ). Это произошло за счет понижения

степени повреждения ПКС до нормы или повышения до полного разрыва на фМРТ, что коррелировало с данными последующей артроскопии (8 подтвержденных диагнозов «частичный разрыв»). Особую сложность на МРТ представляли субсиновиальные разрывы ПКС, когда под неповрежденной синовиальной оболочкой происходил разрыв волокон связки. фМРТ в таких случаях позволяла поставить правильный диагноз (Рисунок 21).

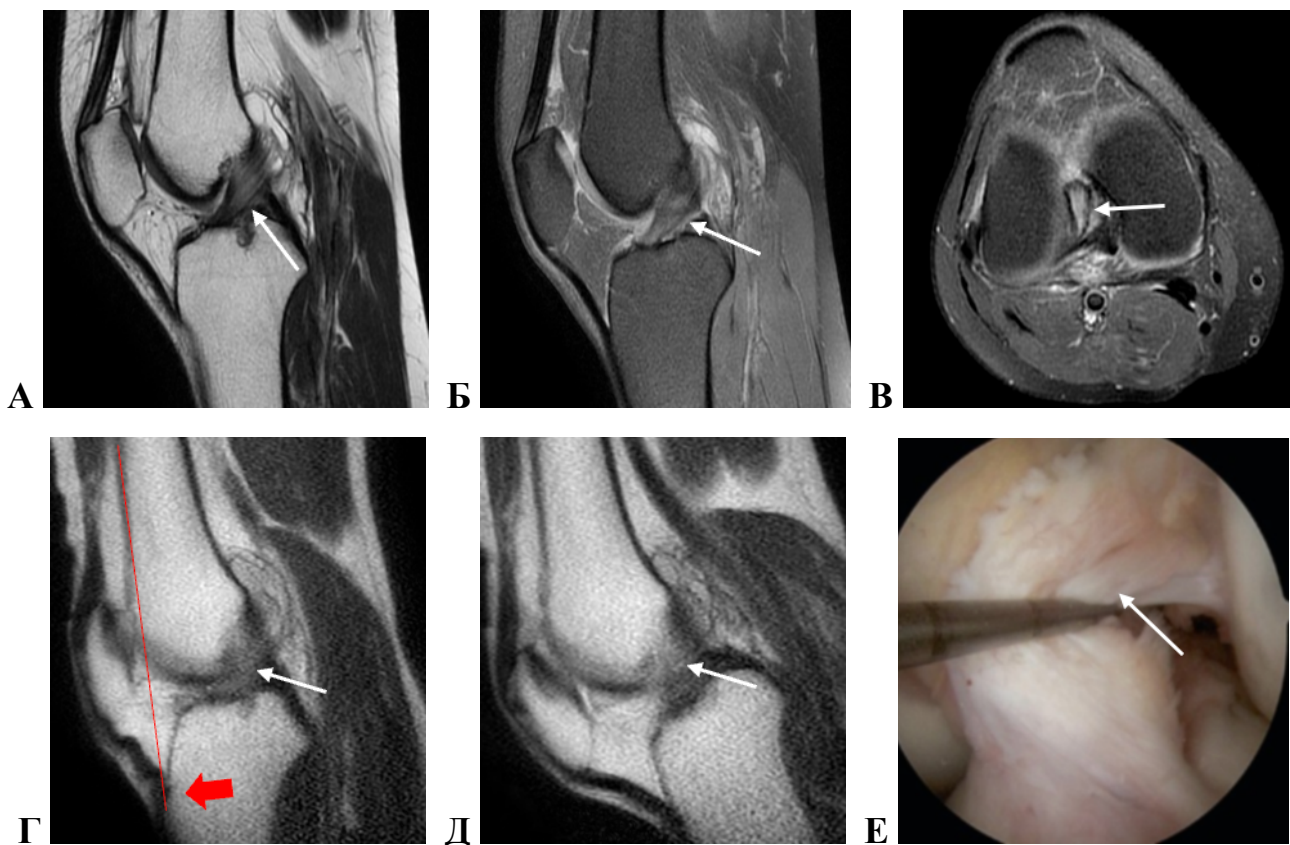


Рисунок 21 – Пациентка К., 33 года. Диагноз: подозрение на разрыв ПКС. МРТ (А, Б, В), фМРТ (Г, Д) и артроскопия (Е). Стрелками показана ПКС. На МРТ в сагиттальной плоскости в режимах T2 (А) и PD FS (Б) и аксиальной плоскости в режиме PD FS (В) ПКС отечна, утолщена, гиперинтенсивна, натяжение ее снижено – изменения расценены как частичный (интерстициальный) разрыв. На фМРТ в положении разгибания (Г) и сгибания на 50° (Д) ПКС четко не прослеживается на всем протяжении, выражено разволокнена, при возврате коленного сустава в положение разгибания отмечается переднее смещение большеберцовой кости – признаки полного разрыва ПКС на фМРТ. Артроскопическая фотография подтверждает полный субсиновиальный разрыв ПКС у пациентки (Е)

После просмотра фМРТ исследователь поставил правильный диагноз в 6 случаях из 7, для которых он уменьшил степень повреждения ПКС, то есть от частичного разрыва к норме или от полного разрыва к частичному/норме. В 1 случае врач-рентгенолог расценил изменения ПКС на МРТ как полный разрыв, но по результатам фМРТ пересмотрел свой диагноз в сторону нормальной связки, что впоследствии было подтверждено артроскопически (Рисунок 22).

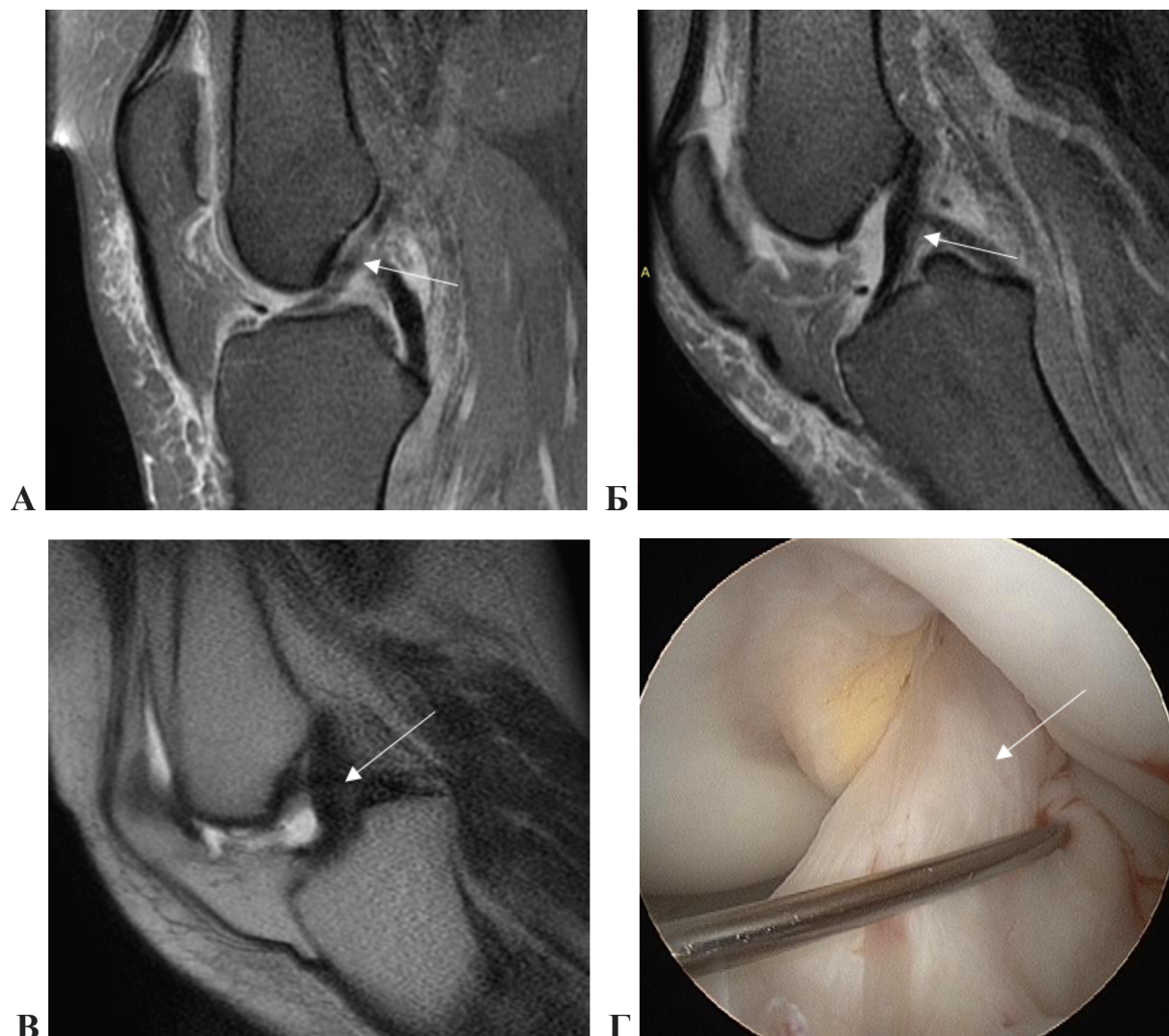


Рисунок 22 – Пациент Д., 30 лет. Диагноз: подозрение на разрыв ПКС.

МРТ (А), фМРТ (Б, В) и артроскопия (Г). Стрелками показана ПКС. На МРТ в сагиттальной плоскости (А) ПКС отечна, разволокнена, натяжение ее снижено – изменения расценены как частичный разрыв. На фМРТ в положении сгибания в режимах PD FS с углом сгибания 30° (Б) и T2 с углом сгибания 50° (В) ПКС имеет хорошее натяжение, однородную гипоинтенсивную структуру, отмечается ее физиологический плавный изгиб кзади – признаки нормальной ПКС на фМРТ. Артроскопическая фотография подтверждает нормальную неизмененную ПКС у пациента (Г)

Уровни достоверности оценки повреждения ПКС для МРТ и фМРТ указаны в Таблице 7.

Уровень достоверности правильного диагноза для фМРТ был значительно выше, чем для МРТ ($p < 0,01$). Средний уровень достоверности правильного диагноза на МРТ и фМРТ был выше, чем неправильного ($p < 0,01$).

Таблица 7 – Уровни достоверности диагностики повреждения ПКС с помощью МРТ и фМРТ

Диагноз	Метод исследования	Количество пациентов	*Средний уровень достоверности
Верный	МРТ	37	3,8649
	фМРТ	54	4,5
Ошибочный	МРТ	23	3,0870
	фМРТ	6	2,6667

Примечание: * средний уровень достоверности рассчитывался в диапазоне 1–5, где 5 – очень вероятно

Диагностическое согласие между МРТ и артроскопией для МРТ было «умеренным» со взвешенным значением $k = 0,4300$. В то же время диагностическое согласие между фМРТ и артроскопией было «отличным» со взвешенными значениями $k = 0,8377$.

3.3. Результаты магнитно-резонансной томографии и функциональной магнитно-резонансной томографии коленного сустава у пациентов с подозрением на повреждение трансплантата передней крестообразной связки

МРТ и фМРТ исследования были выполнены последовательно: первоначально оценивали состояние трансплантата ПКС по данным МРТ коленного сустава, а затем с помощью фМРТ.

Тяжесть повреждения трансплантата ПКС оценивали по 3-балльной шкале, аналогично нативной ПКС [228]. Трансплантат ПКС расценивали как нормальный при низкой интенсивности сигнала во всех типах взвешенности, однородной структуре и достаточном натяжении с типичным ходом волокон.

Гиперинтенсивный сигнал на PD FS ИП, отек, утолщение или истончение, разволокнение, локальная ангуляция при сохранении целостности трактовались как частичный разрыв. Диагноз полного разрыва устанавливали при нарушении непрерывности или аномальном ходе, полнослойных дефектах, смещении волокон, резком удлинении и истончении трансплантата [228].

При оценке МР-сигнала от трансплантата учитывался срок с момента операции для разграничения лигаментизации трансплантата и интерстициального повреждения, что было особенно актуально в период от 6 месяцев до 1–1,5 лет после пластики ПКС [273].

МР-анатомия интактного трансплантата ПКС на фМРТ в различных положениях сгибания и биомеханика сустава в движении соответствовали таковой для нормальной ПКС на фМРТ (Рисунок 23).

Для трансплантата на фМРТ были разработаны и использованы новые, дополнительные признаки его повреждения: появление дефектов, нарушение непрерывности хода волокон в движении; отсутствие непрерывного натяжения трансплантата в движении; утрата трансплантатом физиологических изгибов кзади при разгибании и кпереди при сгибании; патологическое смещение переднего края большеберцовой кости кпереди относительно передней кортикальной пластинки бедренной кости при возврате сустава в положение разгибания (Рисунок 24).

Помимо оценки степени повреждения трансплантата ПКС, проводили оценку достоверности диагноза для МРТ и фМРТ, а также оценку диагностического согласия между результатами МРТ, фМРТ и артроскопии.

Результаты МРТ и фМРТ сравнивали с отчетами артроскопии в качестве эталонного стандарта для определения состояния трансплантата ПКС: артроскопическая диагностика выявила неповрежденные трансплантаты ПКС у 17 пациентов, частичные разрывы трансплантата – в 6 случаях, полные разрывы – у 15 пациентов.

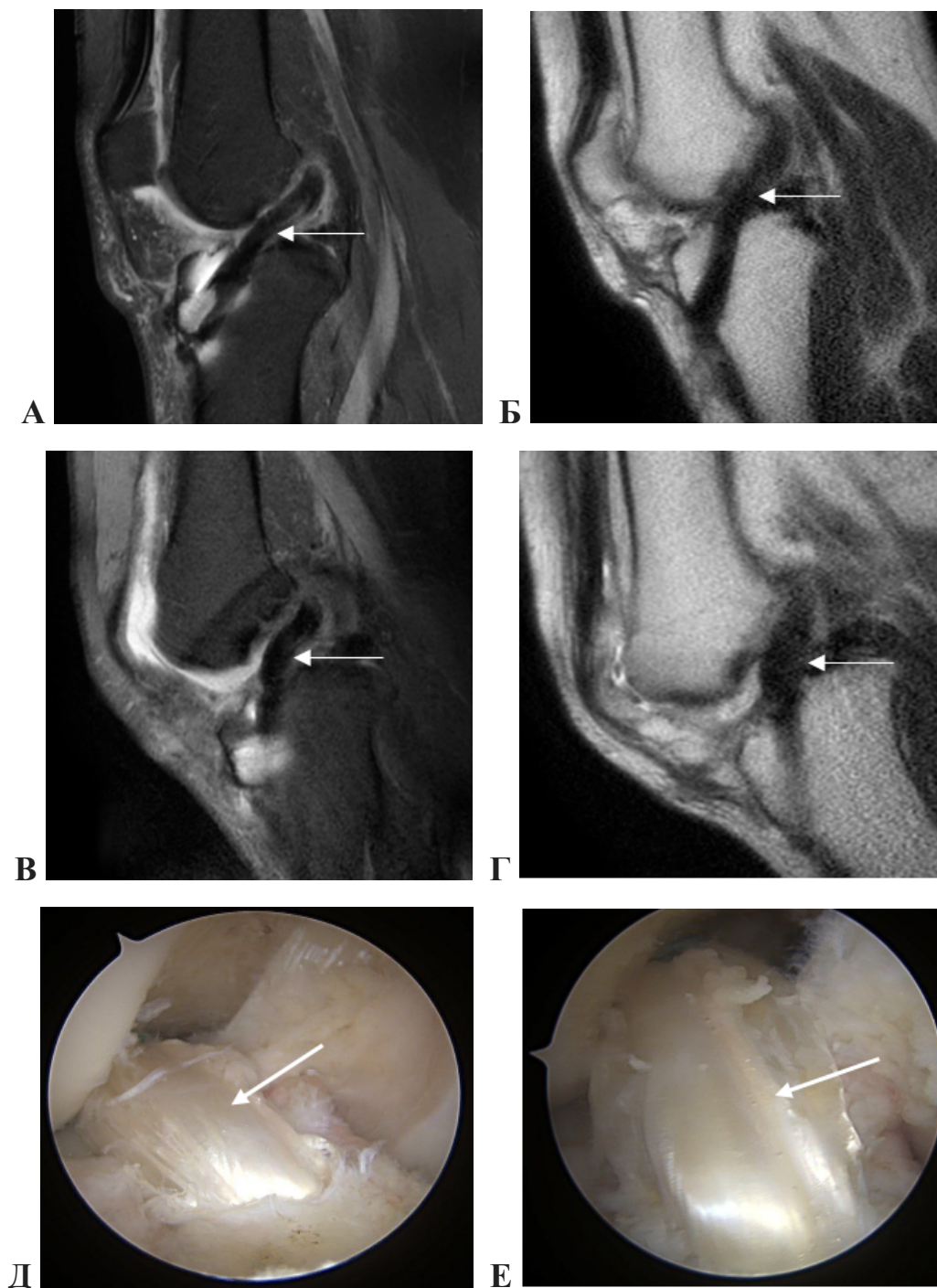


Рисунок 23 – Пациент А., 20 лет. Пластика ПКС ауто трансплантатом из сухожилия длинной малоберцовой мышцы 1 год назад.

фМРТ (А-Г), артроскопические фотографии (Д, Е).

фМРТ коленного сустава в кососагиттальной плоскости, ориентированной по трансплантату ПКС в режимах PD FS (А, В) и SS-FSE (Б, Г). Стрелкой показан неизменный трансплантат ПКС в положении разгибания (А, Б) и сгибания на 50° (В, Г). Отмечается физиологический плавный изгиб волокон трансплантата кпереди при сгибании и практически прямой ход при разгибании.

На артроскопических фотографиях (Д, Е) продемонстрирован анатомический, низко расположенный трансплантат с косым ходом волокон в бедренной вырезке

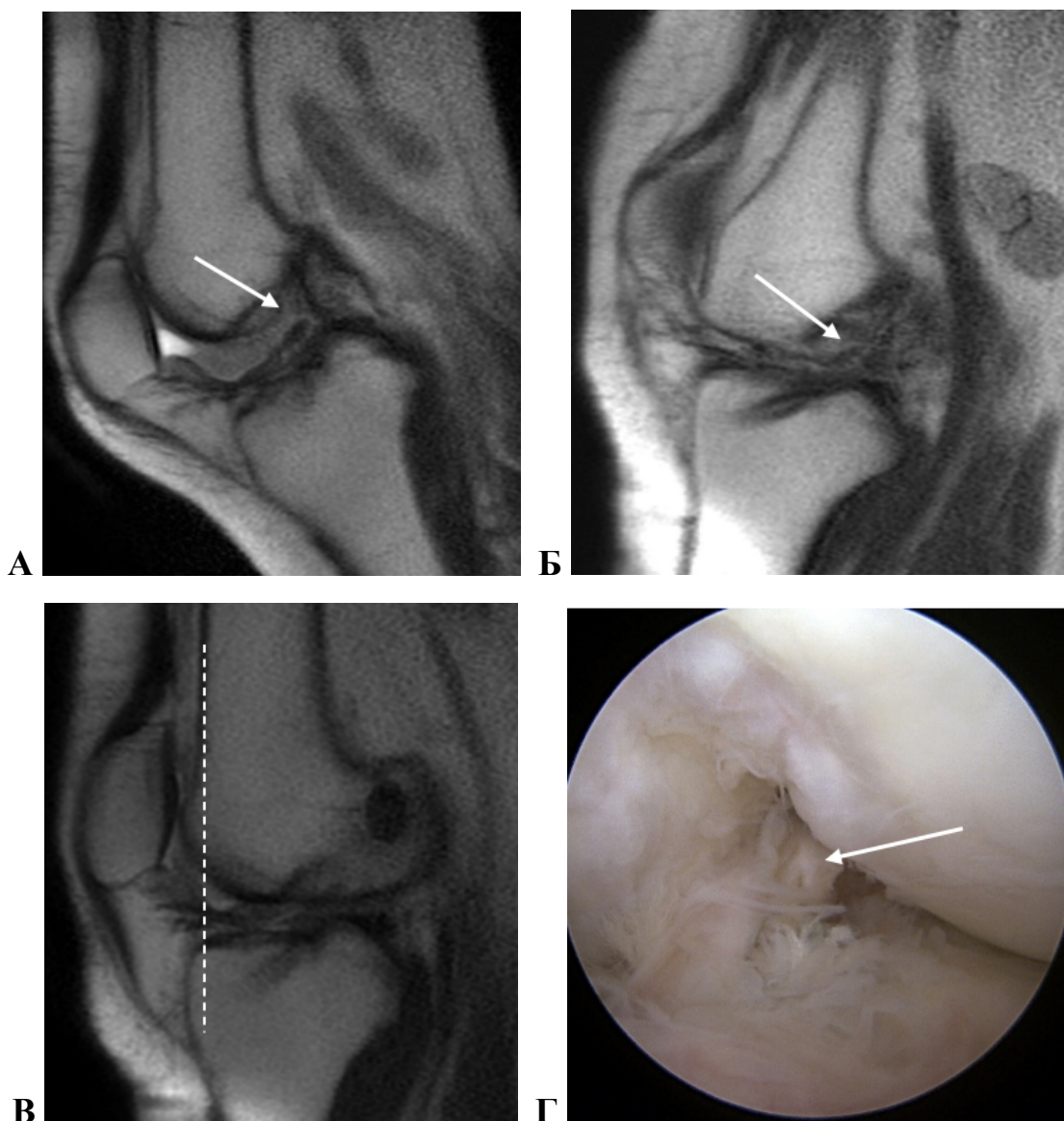


Рисунок 24 – Пациентка В., 39 лет. Диагноз: подозрение на разрыв трансплантата ПКС. фМРТ. Продемонстрированы дополнительные признаки разрыва трансплантата ПКС (А–В) и артроскопическая фотография (Г). Стрелками показан трансплантат ПКС. Пунктирная линия проведена через переднюю кортикальную пластинку бедренной кости.

А: на фМРТ в положении сгибания на 45° отмечается дефект трансплантата ПКС в среднем сегменте с наличием двух культей проксимальнее и дистальнее зоны разрыва (стрелка). Б: на фМРТ в положении сгибания на 20° наблюдается потеря эластичности трансплантата с его истончением, отсутствием натяжения и «провисанием» (стрелка). В: на фМРТ при возврате колена в положение разгибания отмечается патологическое переднее смещение большеберцовой кости относительно бедренной (пунктирная линия). Г: артроскопическая фотография подтверждает полный разрыв трансплантата ПКС с визуализацией обрывков волокон и фрагментов культей (стрелка)

Чувствительность, специфичность и точность обнаружения повреждения трансплантата ПКС рассчитывали отдельно, исходя из тяжести повреждения трансплантата ПКС, по той же 3-балльной шкале (0 – неповрежденный трансплантат ПКС, 1 – частичный разрыв, 2 – полный разрыв). Значение $p < 0,01$ считалось статистически значимым.

Распределение пациентов по степени повреждения трансплантата ПКС для МРТ и фМРТ с артроскопической верификацией суммированы в Таблице 8.

Таблица 8 – Распределение пациентов по степени разрыва трансплантата ПКС на стандартной МРТ и фМРТ с артроскопической верификацией

Артроскопия	МРТ				фМРТ			
	0*	1*	2*	Всего	0*	1*	2*	Всего
Норма	11	4	2	17	16	1	0	17
Частичный разрыв	2	3	1	6	1	5	0	6
Полный разрыв	2	3	10	15	0	1	14	15
Всего	15	10	13	38	17	7	14	38

Примечание. * – степени разрыва ПКС: 0 – норма, 1 – частичный разрыв, 2 – полный разрыв. Цифровые значения в таблице – количество пациентов

После просмотра фМРТ врач-рентгенолог в 6 случаях уменьшил степень повреждения трансплантата ПКС, в 5 случаях увеличил степень повреждения трансплантата ПКС (всего 11 расхождений между заключениями МРТ и фМРТ).

Все случаи пересмотра МРТ заключения после фМРТ в сторону понижения степени повреждения ауто трансплантата (от частичного разрыва – к норме, от полного разрыва – к частичному разрыву/норме) оказались верными и были подтверждены артроскопически (Рисунок 25).

Все случаи пересмотра МРТ заключения после фМРТ в сторону повышения степени повреждения трансплантата (от нормы – к частичному/полному разрыву или от частичного разрыва – к полному) также оказались верными и были подтверждены артроскопически (Рисунок 26).

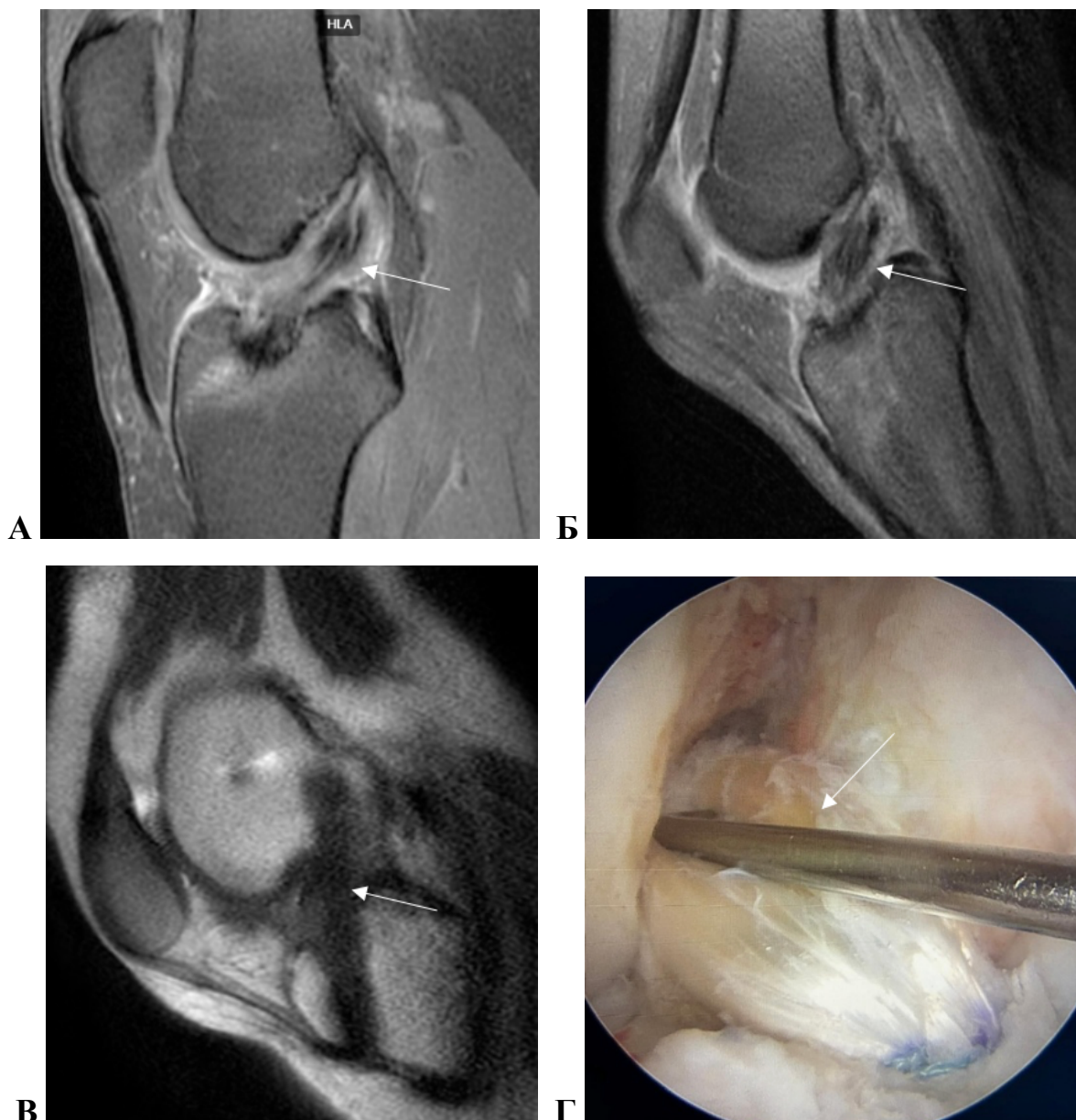


Рисунок 25 – Пациент Д., 31 год. Диагноз: подозрение на разрыв трансплантата ПКС. МРТ (А), фМРТ (Б, В) и артроскопия (Г). Стрелками показан трансплантат ПКС. На МРТ в сагиттальной плоскости (А) трансплантат ПКС отечен, разволокнен, натяжение ее снижено – изменения расценены как частичный разрыв (А). На фМРТ в положении сгибания в режимах PD FS (Б) и SS-FSE (В) с углом сгибания 45–50° трансплантат ПКС имеет хорошее натяжение, достаточно однородную гипоинтенсивную структуру, отмечается его физиологический плавный изгиб кзади – признаки нормального трансплантата ПКС на фМРТ. Фотография во время артроскопии подтверждает нормальный неизмененный аутографт ПКС у пациента (Г)

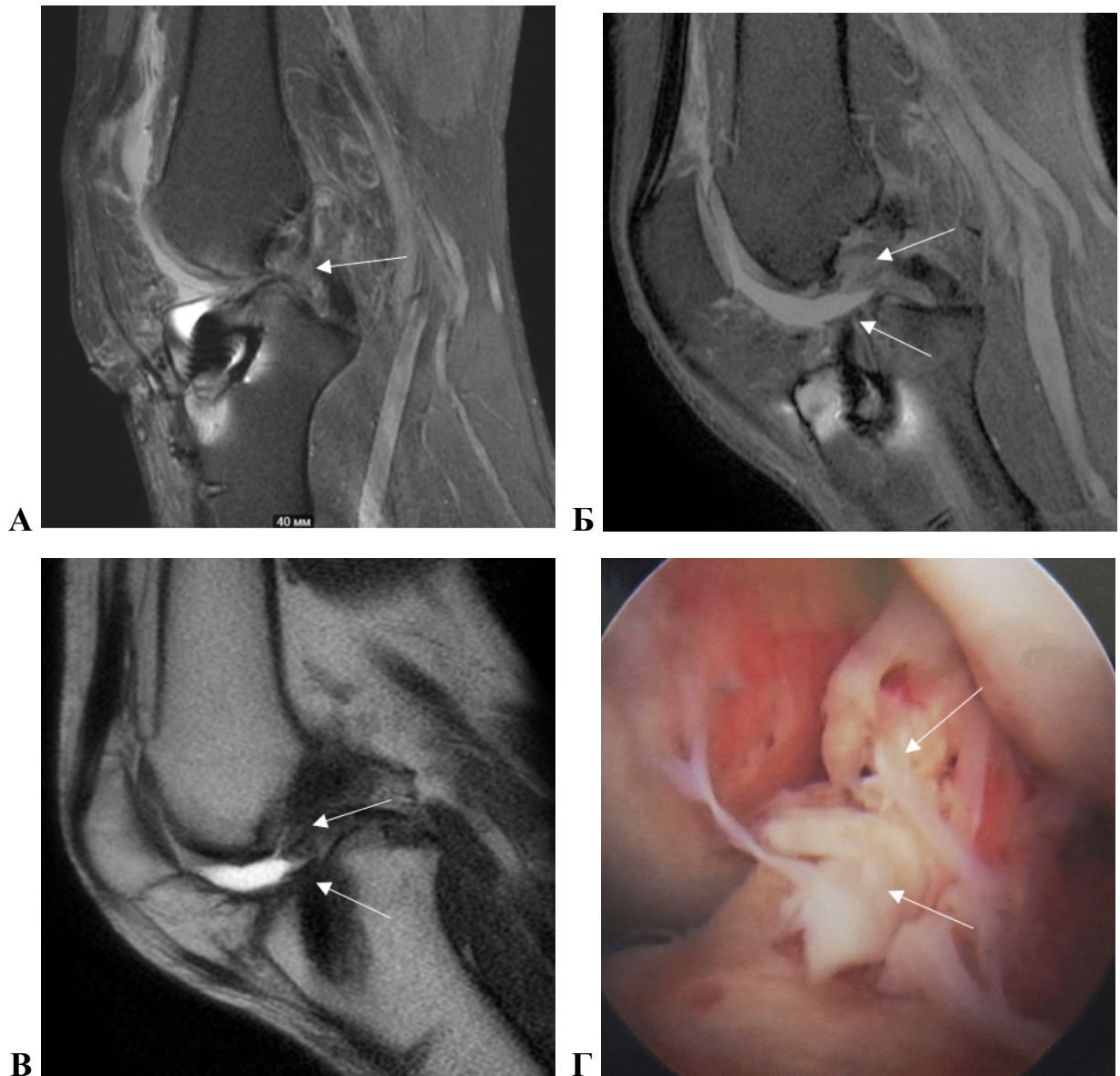


Рисунок 26 – Пациентка М., 26 лет. Диагноз: подозрение на разрыв трансплантата ПКС. МРТ (А), фМРТ (Б, В) и артроскопия (Г). Стрелками показан трансплантат ПКС. На МРТ в сагиттальной плоскости (А) ПКС в режиме PD FS трансплантат неоднородной структуры за счет участков повышения МР-сигнала, умерено истончен, пролеживается на всем протяжении – изменения расценены как частичный разрыв. На фМРТ в положении сгибания в режимах PD FS (Б) и SS-FSE (В) с углом сгибания 45–50° отмечается полный разрыв трансплантата в средней порции с формированием проксимальной и дистальной культей. Фотография во время артроскопии демонстрирует полный разрыв трансплантата ПКС с формированием культей (Г)

фМРТ существенно сократила количество ошибочных заключений «частичный разрыв» по данным классической МРТ (в 5 исследованиях) и общее количество МР-диагнозов «частичный разрыв» трансплантата ПКС, что

коррелировало с данными последующей артроскопии (6 подтвержденных диагнозов частичный разрыв).

Уровни достоверности оценки повреждения трансплантата ПКС для МРТ и фМРТ указаны в Таблице 9. Уровень достоверности правильного диагноза для фМРТ был значительно выше, чем для МРТ ($p < 0,01$). Средний уровень достоверности правильного диагноза на МРТ и фМРТ был выше, чем неправильного ($p < 0,01$).

Таблица 9 – Уровни достоверности диагностики повреждения трансплантата ПКС с помощью МРТ и фМРТ

Диагноз	Метод исследования	Количество пациентов	*Средний уровень достоверности
Верный	МРТ	24	3,63
	фМРТ	35	4,60
Ошибочный	МРТ	14	2,86
	фМРТ	3	2,66

Примечание: * средний уровень достоверности рассчитывался в диапазоне 1–5, где 5 – очень вероятно

Диагностическое согласие между МРТ и артроскопией для МРТ было «умеренным» со взвешенными значениями $k = 0,430$. В то же время показатели фМРТ были «отличными» со взвешенными значениями $k = 0,874$.

3.4. Результаты артроскопического оперативного вмешательства у пациентов с подозрением на повреждение передней крестообразной связки и трансплантата передней крестообразной связки

Всем обследованным с помощью РГ, МРТ и фМРТ пациентам с подозрением на повреждение ПКС и трансплантата ПКС с 2022 по 2025 гг. была выполнена артроскопия коленного сустава на базе травматолого-ортопедического отделения АНО ЦКБ Святителя Алексия.

В протоколах оперативного вмешательства особое внимание уделялось состоянию ПКС и трансплантата.

Артроскопическая диагностика выявила неповрежденные ПКС у 25 пациентов, частичные разрывы ПКС – в 8 случаях, полные разрывы ПКС – у 27 пациентов.

Разрыв ПКС на артроскопии трактовали как полный при видимом перерыве волокон, часто с разволокненными краями или ретракцией культы. Другие признаки включали невозможность визуализации нормальной «конечной точки» при зондировании, «симптом щели» – видимое пространство или щель в медиальном мениске, указывающие на его нестабильность вследствие разрыва ПКС, а также симптом «пустой стенки» – отсутствие нормальной поддержки со стороны ЗКС, указывающее на недостаточную стабильность задней поверхности коленного сустава. В случае сомнений в целостности ПКС выполняли клинические тесты в момент артроскопии, которые показывали аномальную нестабильность или патологическую подвижность большеберцовой кости относительно бедренной кости во время их проведения.

Всего полный разрыв ПКС был выявлен у 45% пациентов ($n = 27$). У 15% пациентов ($n = 9$) при полном разрыве ПКС обнаруживали кровь внутри сустава, что свидетельствовало об остром характере повреждения связки.

Диагноз частичного разрыва на артроскопии устанавливали, если были видны некоторые неповрежденные волокна с видимым разрывом в толще связки или повреждение одного из 2-х пучков ПКС (ПМ или ЗЛ). В ряде случаев для подтверждения однопучкового разрыва ПКС проводили дополнительный тест продавливания. Положительный результат теста указывал на то, что визуально неповрежденный ПМ или ЗЛ пучок ослаблен и имеет структурные повреждения, то есть имеется частичный разрыв.

Всего частичный разрыв ПКС был выявлен у 13,3% пациентов ($n = 8$), из них у 5 пациентов наблюдалось повреждение ПМ пучка, у 3 пациентов наблюдалось повреждение ЗЛ пучка ПКС и было выполнено однопучковое восстановление ПКС.

У 41,7% пациентов ($n = 25$) на артроскопии визуализировали нормальную, неповрежденную ПКС. При этом отмечались другие повреждения коленного сустава, которые требовали хирургической коррекции: у 21,7% ($n = 13$) пациентов

выполнена резекция медиального мениска, у 11,7% (n = 7) – резекция латерального мениска, у 8,3% пациентов (n = 5) – шов мениска.

Распределение изменений ПКС по степени повреждения, выявленных при оперативном вмешательстве, представлено в Таблице 10.

Таблица 10 – Распределение изменений ПКС по степени повреждения, согласно результатам артроскопии

Диагноз	Артроскопия	
	Абс. количество случаев	%
Норма	25	41,7
Частичный разрыв	8	13,3
Полный разрыв	27	45,0

Следует также отметить, что по результатам артроскопии была проведена оценка корреляции между симптомами – первичными жалобами и фактом травмы пациентов, и окончательным диагнозом состояния ПКС: норма, частичный либо полный разрыв (Рисунок 27).

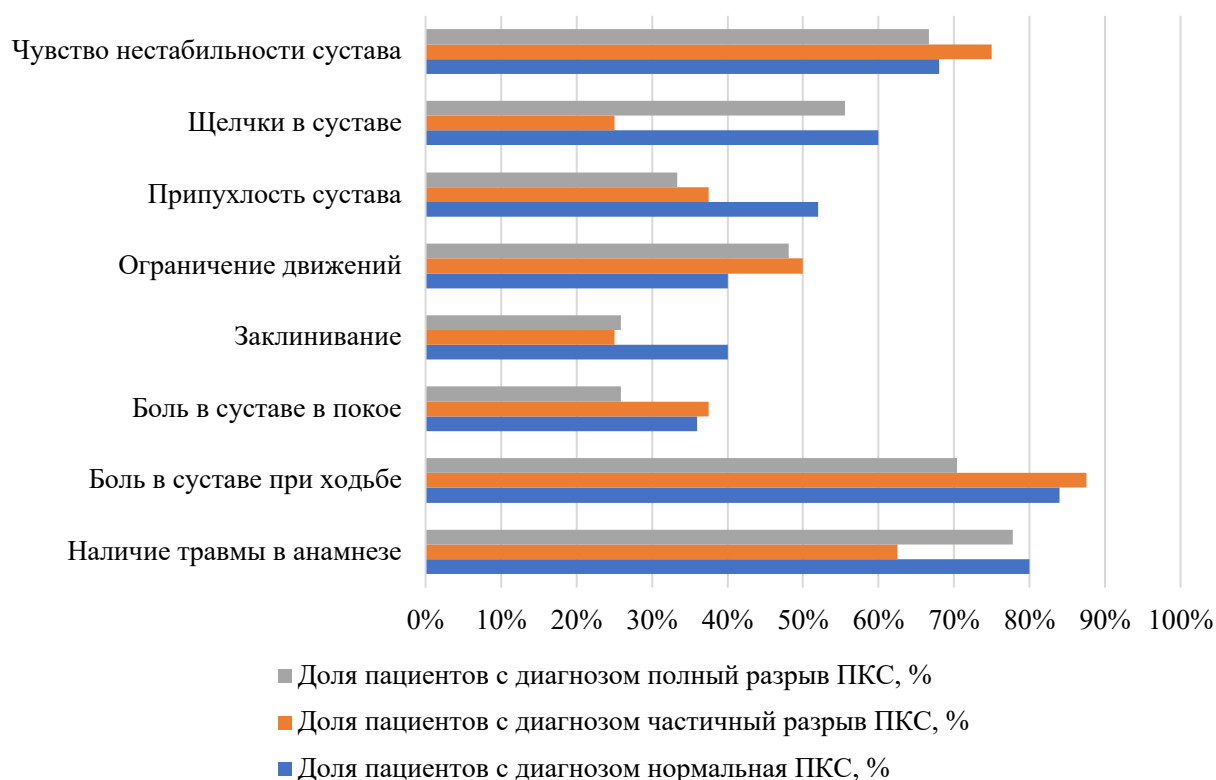


Рисунок 27 – Распределение частоты симптомов у пациентов (в %) и окончательного диагноза состояния ПКС по данным артроскопии

Статистически значимой монотонной связи между всеми симптомами и диагнозом не обнаружено ($p > 0,05$) (Таблица 11).

Таблица 11 — Корреляция Спирмена между окончательным диагнозом повреждения ПКС (норма, частичный разрыв, полный разрыв) и симптомами

Симптом	Коэффициент корреляции	p-value
Ограничение движений	0,0752	0,57
Чувство нестабильности сустава	-0,0147	0,91
Щелчки в суставе	-0.0359	0,79
Боль в суставе в покое	-0,1019	0,44
Заклинивание	-0,1393	0,29
Боль в суставе при ходьбе	-0,1560	0,23
Припухлость сустава	-0,1752	0,18
Наличие травмы в анамнезе	0,0211	0,87

Таким образом, симптомы пациентов при подозрении на повреждение ПКС оказались неспецифичными, а их наличие либо отсутствие не коррелировало с результатами последующей артроскопии. Для неинвазивной диагностики повреждения ПКС следует прибегать к клиническим тестам и использовать методы лучевой диагностики.

Артроскопическая диагностика выявила интактные трансплантаты ПКС у 17 пациентов, частичные разрывы трансплантата – в 6 случаях, полные разрывы – у 15 пациентов.

Разрыв трансплантата на артроскопии трактовался как полный при видимом перерыве волокон, а также при наличии явной нестабильности в суставе при сохранении отдельных порций волокон.

Всего полный разрыв трансплантата ПКС был выявлен у 39,5% пациентов ($n = 15$). У всех пациентов с полным разрывом трансплантата выполнялась одноэтапная ревизионная реконструкция ПКС.

Диагноз частичного разрыва трансплантата на артроскопии устанавливался, когда была сохранена часть волокон сухожилия, способных выполнять функцию ПКС. Всего частичный разрыв трансплантата ПКС был выявлен у 15,8% пациентов (n = 6).

У 44,7% пациентов (n = 17) на артроскопии визуализировали нормальный, неизмененный трансплантат ПКС. При этом отмечали другие повреждения коленного сустава, которые требовали хирургической коррекции: у 21,1% (n = 8) пациентов выполнена резекция медиального или латерального мениска, у 13,2% пациентов (n = 7) – удаление рубцов в связи с локализованным артрофиброзом.

В ходе артроскопической оценки учитывали срок, прошедший с момента пластики ПКС, влияющий на степень реваскуляризации и лигаментизации трансплантата. Через 18 месяцев после реконструкции ПКС покрытие трансплантата синовиальной оболочкой менее 50% трактовалось как плохое и ассоциировалось с вероятным повреждением трансплантата в ходе лигаментизации, либо плохим заживлением и повышенным риском несостоятельности трансплантата в будущем.

Распределение изменений трансплантата ПКС по степени повреждения, выявленных при оперативном вмешательстве, представлено в Таблице 12.

Таблица 12 – Распределение изменений трансплантата ПКС по степени повреждения, согласно результатам артроскопии

Диагноз	Артроскопия	
	Абс. количество случаев	%
Норма	17	44,7
Частичный разрыв	6	15,8
Полный разрыв	15	39,5

3.5. Диагностическая эффективность и прогностическая ценность магнитно-резонансной томографии и функциональной магнитно-резонансной томографии у пациентов с подозрением на повреждение передней крестообразной связки

Расчет параметров диагностической эффективности и прогностической ценности у пациентов с подозрением на повреждение ПКС для МРТ и фМРТ проводили на основе сопоставления истинно- и ложноположительных и отрицательных результатов при корреляции с референс-методом (артроскопией). Полученные значения были корректны, так как объем выборки в исследовании для показателя статистической значимости ($p < 0,01$) был достаточен, согласно правилу размера выборки центральной предельной теоремы ($n \geq 30$).

Диагностическая эффективность МРТ и фМРТ у пациентов при неповрежденной ПКС. Для МРТ количество истинно положительных результатов (TP) при неповрежденной ПКС составило 16, ложноположительных (FP) – 5, истинно отрицательных (TN) – 30, ложноотрицательных (FN) – 9.

Для фМРТ при неповрежденной ПКС: TP – 23, FP – 1, TN – 34, FN – 2.

Показатели Sn, Sp и Ac были рассчитаны по формулам, представленным в разделе 2.2.4.

Для МРТ при нормальной ПКС были получены следующие показатели:

- $S_n = 16 / (16+9) \times 100\% = 64,0\%$;
- $S_p = 30 / (30+5) \times 100\% = 85,71\%$;
- $A_c = (16+30) / (16+30+5+9) \times 100\% = 76,67\%$.

Для фМРТ при нормальной ПКС были получены следующие показатели:

- $S_n = 23 / (23+2) \times 100\% = 92,0\%$;
- $S_p = 34 / (34+1) \times 100\% = 97,14\%$;
- $A_c = (23+34) / (23+34+1+2) \times 100\% = 95,00\%$.

Прогностическая ценность МРТ и фМРТ у пациентов при неповрежденной ПКС. Показатели PPV и NPV были рассчитаны по формулам, представленным в разделе 2.2.4.

Для МРТ при нормальной ПКС были получены следующие показатели:

- $PPV = 16 / (16 + 5) \times 100\% = 76,19\%$;
- $NPV = 30 / (30 + 9) = 76,92\%$.

Для МРТ при нормальной ПКС были получены следующие показатели:

- $PPV = 23 / (23 + 1) \times 100\% = 95,83\%$;
- $NPV = 34 / (34 + 2) \times 100\% = 94,44\%$.

Диагностическая эффективность и прогностическая ценность МРТ и фМРТ в отношении неповрежденной ПКС представлена на Рисунке 28.

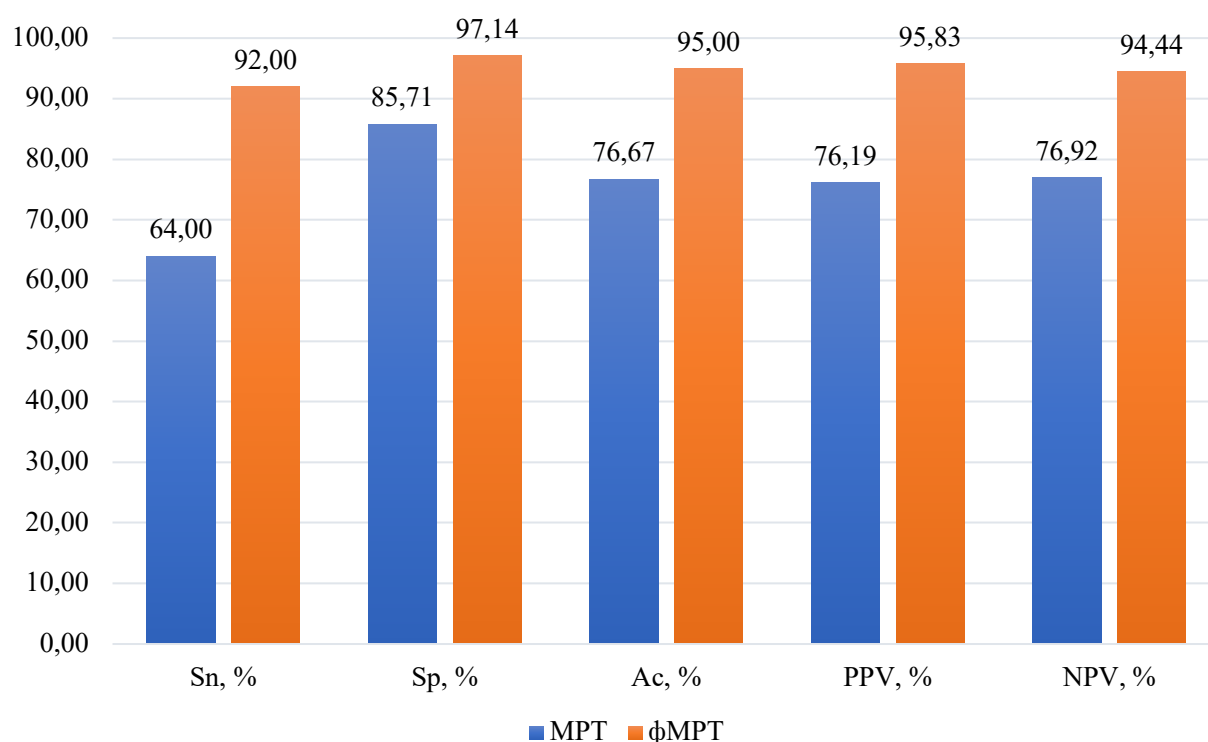


Рисунок 28 – Показатели диагностической эффективности и прогностической ценности МРТ и фМРТ при выявлении неповрежденной ПКС

Диагностическая эффективность МРТ и фМРТ у пациентов с частичным разрывом ПКС. Для МРТ у пациентов с частичным разрывом ПКС: TP – 5, FP – 16, TN – 36, FN – 3.

Для фМРТ у пациентов с частичным разрывом ПКС: TP – 6, FP – 4, TN – 48, FN – 2.

Для МРТ:

- $S_n = 5 / (5+3) \times 100\% = 62,5\%$;
- $S_p = 36 / (36+16) \times 100\% = 69,23\%$;
- $A_c = (5+36) / (5+16+3+36) \times 100\% = 68,33\%$.

Для фМРТ:

- $S_n = 6 / (6+2) \times 100\% = 75,0\%$;
- $S_p = 48 / (48+4) \times 100\% = 92,31\%$;
- $A_c = (6+48) / (6+4+2+48) \times 100\% = 90,00\%$.

Прогностическая ценность МРТ и фМРТ у пациентов с частичным разрывом ПКС.

Для МРТ:

- $PPV = 5 / (5 + 16) \times 100\% = 23,81\%$;
- $NPV = 36 / (36 + 3) \times 100\% = 92,31\%$.

Для фМРТ:

- $PPV = 6 / (6 + 4) \times 100\% = 60,00\%$;
- $NPV = 48 / (48+2) = 96,00\%$.

Диагностическая эффективность и прогностическая ценность МРТ и фМРТ в отношении частичного разрыва ПКС представлена на Рисунке 29.

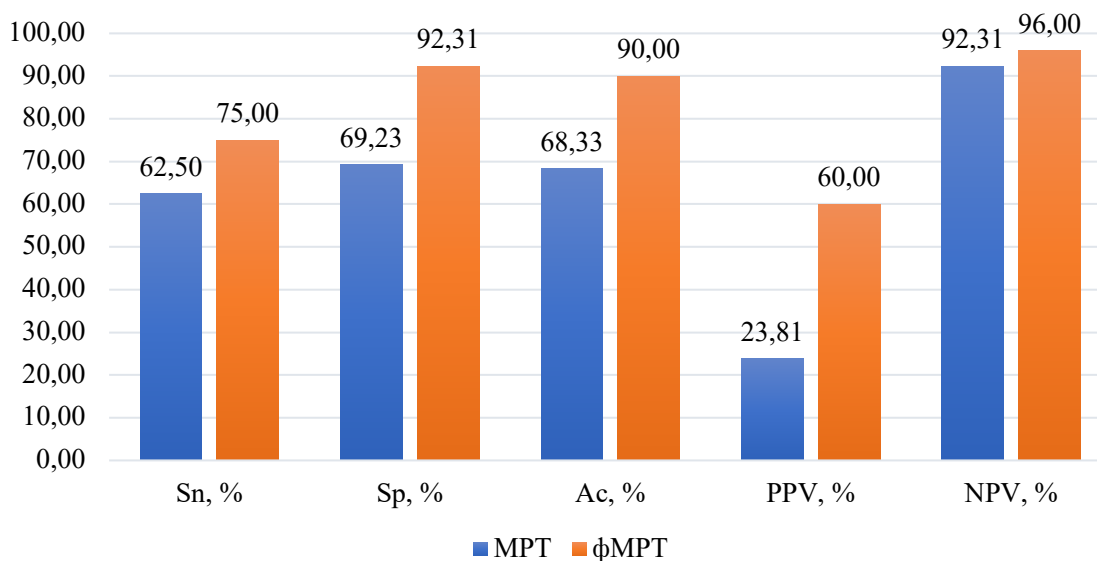


Рисунок 29 – Показатели диагностической эффективности и прогностической ценности МРТ и фМРТ при выявлении частичного разрыва ПКС

Диагностическая эффективность МРТ и фМРТ у пациентов с полным разрывом ПКС. Для МРТ у пациентов с полным разрывом ПКС: TP – 16, FP – 2, TN – 31, FN – 11.

Для фМРТ у пациентов с полным разрывом ПКС: TP – 25, FP – 1, TN – 32, FN – 2.

Для МРТ:

- $S_n = 16 / (16+11) \times 100\% = 59,26\%$;
- $S_p = 31 / (31+2) \times 100\% = 93,94\%$;
- $A_c = (16+31) / (16+2+11+31) \times 100\% = 78,33\%$.

Для фМРТ:

- $S_n = 25 / (25+2) \times 100\% = 92,59\%$;
- $S_p = 32 / (32+1) \times 100\% = 96,97\%$;
- $A_c = (25+32) / (25+1+2+32) \times 100\% = 95,00\%$.

Прогностическая ценность МРТ и фМРТ у пациентов с полным разрывом ПКС.

Для МРТ:

- $PPV = 16 / (16+ 2) \times 100\% = 88,89\%$;
- $NPV = 31 / (31 + 11) \times 100\% = 73,81\%$.

Для фМРТ:

- $PPV = 25 / (25 +1) \times 100\% = 96,15\%$;
- $NPV = 32 / (32+2) = 94,12\%$.

Диагностическая эффективность и прогностическая ценность МРТ и фМРТ в отношении полного разрыва ПКС представлена на Рисунке 30.

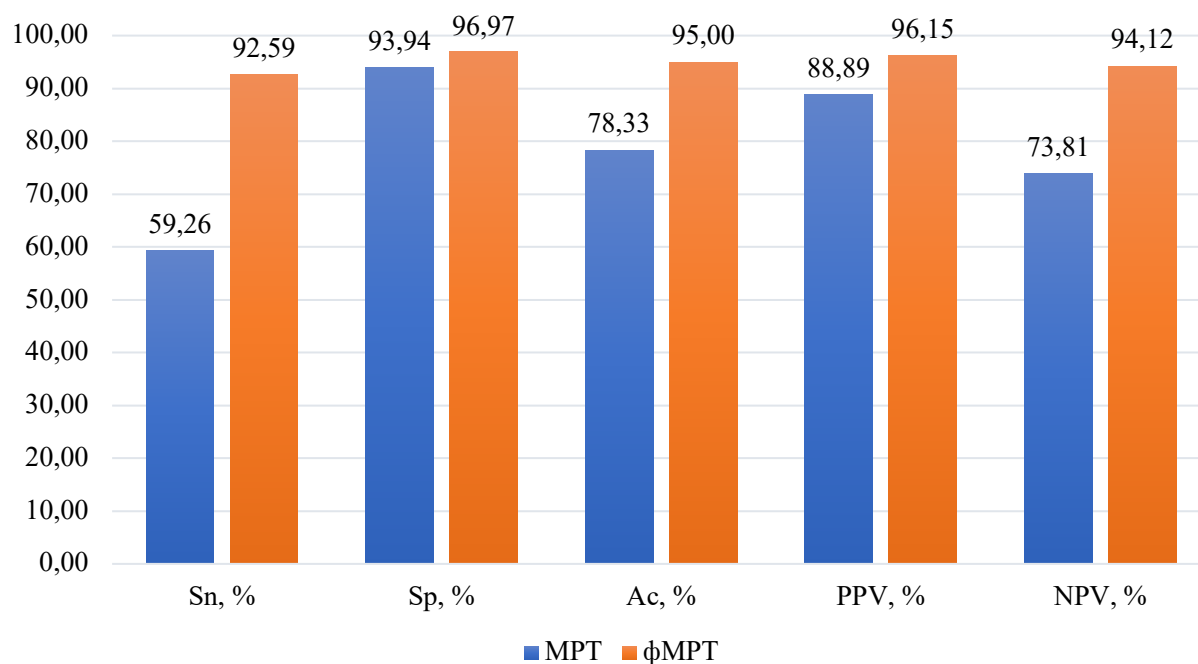


Рисунок 30 – Показатели диагностической эффективности и прогностической ценности МРТ и фМРТ при выявлении полного разрыва ПКС

Чувствительность, специфичность и точность МРТ и фМРТ в диагностике разрыва ПКС указаны в Таблице 13.

Таблица 13 – Чувствительность, специфичность и точность МРТ и фМРТ в диагностике разрыва ПКС

Диагноз	МРТ			фМРТ		
	Sn, %	Sp, %	Ac, %	Sn, %	Sp, %	Ac, %
Норма	64,00	85,71	76,67	92,00	97,14	95,00
Частичный разрыв	62,50	69,23	68,33	75,00	92,31	90,00
Полный разрыв	59,26	93,94	78,33	92,59	96,97	95,00

Показатели положительной и отрицательной прогностической ценности результата МРТ и фМРТ в диагностике разрыва ПКС указаны в Таблице 14.

Таблица 14 – Показатели положительной и отрицательной прогностической ценности результата МРТ и фМРТ в диагностике разрыва ПКС

Диагноз	МРТ		фМРТ	
	PPV, %	NPV, %	PPV, %	NPV, %
Норма	76,19	76,92	95,83	94,44
Частичный разрыв	23,81	92,31	60,00	96,00
Полный разрыв	88,89	73,81	96,15	94,12

3.6. Диагностическая эффективность и прогностическая ценность магнитно-резонансной томографии и функциональной магнитно-резонансной томографии у пациентов с подозрением на повреждение трансплантата передней крестообразной связки

Расчет параметров диагностической эффективности и прогностической ценности у пациентов с подозрением на повреждение трансплантата ПКС для МРТ и фМРТ также проводили на основе сопоставления истинно- и ложноположительных и отрицательных результатов при корреляции с референс-методом (артроскопией). Полученные значения были корректны, так как объем выборки в исследовании для показателя статистической значимости ($p < 0,01$) был достаточен, согласно правилу размера выборки центральной предельной теоремы ($n \geq 30$).

Диагностическая эффективность МРТ и фМРТ у пациентов при неповрежденном трансплантате ПКС. Для МРТ у пациентов при неповрежденном трансплантате ПКС: TP – 11, FP – 4, TN – 17, FN – 6.

Для фМРТ у пациентов при неповрежденном трансплантате ПКС: TP – 16, FP – 1, TN – 20, FN – 1.

Для МРТ:

- $S_n = 11 / (11+6) \times 100\% = 64,71\%$;
- $S_p = 17 / (17+4) \times 100\% = 80,95\%$;
- $A_c = (11+17) / (11+4+6+17) \times 100\% = 73,68\%$.

Для фМРТ:

- $S_n = 16 / (16+1) \times 100\% = 94,12\%$;
- $S_p = 20 / (20+1) \times 100\% = 95,24\%$;
- $A_c = (16+20) / (16+1+1+20) \times 100\% = 94,74\%$.

Прогностическая ценность МРТ и фМРТ у пациентов при неповрежденном трансплантате ПКС. Для МРТ:

- $PPV = 11 / (11 + 4) \times 100\% = 73,33\%$;
- $NPV = 17 / (17 + 6) \times 100\% = 73,91\%$.

Для фМРТ:

- $PPV = 16 / (16 + 1) \times 100\% = 94,12\%$;
- $NPV = 20 / (20 + 1) = 95,24\%$.

Диагностическая эффективность и прогностическая ценность МРТ и фМРТ при выявлении неповрежденного трансплантата ПКС представлена на Рисунке 31.

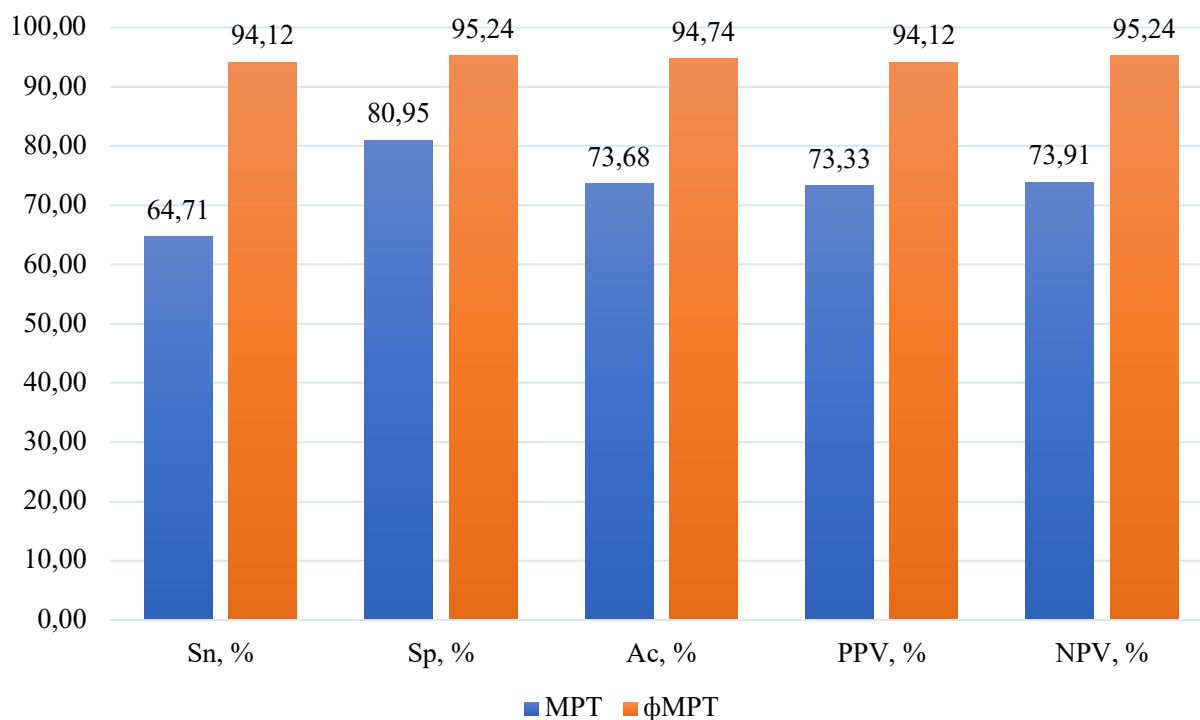


Рисунок 31 – Показатели диагностической эффективности и прогностической ценности МРТ и фМРТ при выявлении неповрежденного трансплантата ПКС

Диагностическая эффективность МРТ и фМРТ у пациентов с частичным разрывом трансплантата ПКС. Для МРТ у пациентов с частичным разрывом трансплантата ПКС: TP – 3, FP – 7, TN – 25, FN – 3.

Для фМРТ у пациентов с частичным разрывом трансплантата ПКС: TP – 5, FP – 2, TN – 30, FN – 1.

Для МРТ:

- $Sn = 3 / (3 + 3) \times 100\% = 50,00\%$;
- $Sp = 25 / (25 + 7) \times 100\% = 78,13\%$;
- $Ac = (3 + 25) / (3 + 7 + 3 + 25) \times 100\% = 73,68\%$.

Для фМРТ:

- $S_n = 5 / (5+1) \times 100\% = 83,33\%$;
- $S_p = 30 / (30+2) \times 100\% = 93,75\%$;
- $A_c = (5+30) / (5+2+1+30) \times 100\% = 92,11\%$.

Прогностическая ценность МРТ и фМРТ у пациентов с частичным разрывом трансплантата ПКС. Для МРТ:

- $PPV = 3 / (3+ 7) \times 100\% = 30,00\%$;
- $NPV = 25 / (25 + 3) \times 100\% = 89,29\%$.

Для фМРТ:

- $PPV = 5 / (5 +2) \times 100\% = 71,43\%$;
- $NPV = 30 / (30+1) = 96,77\%$.

Диагностическая эффективность и прогностическая ценность МРТ и фМРТ в отношении частичного разрыва трансплантата ПКС представлена на Рисунке 32.

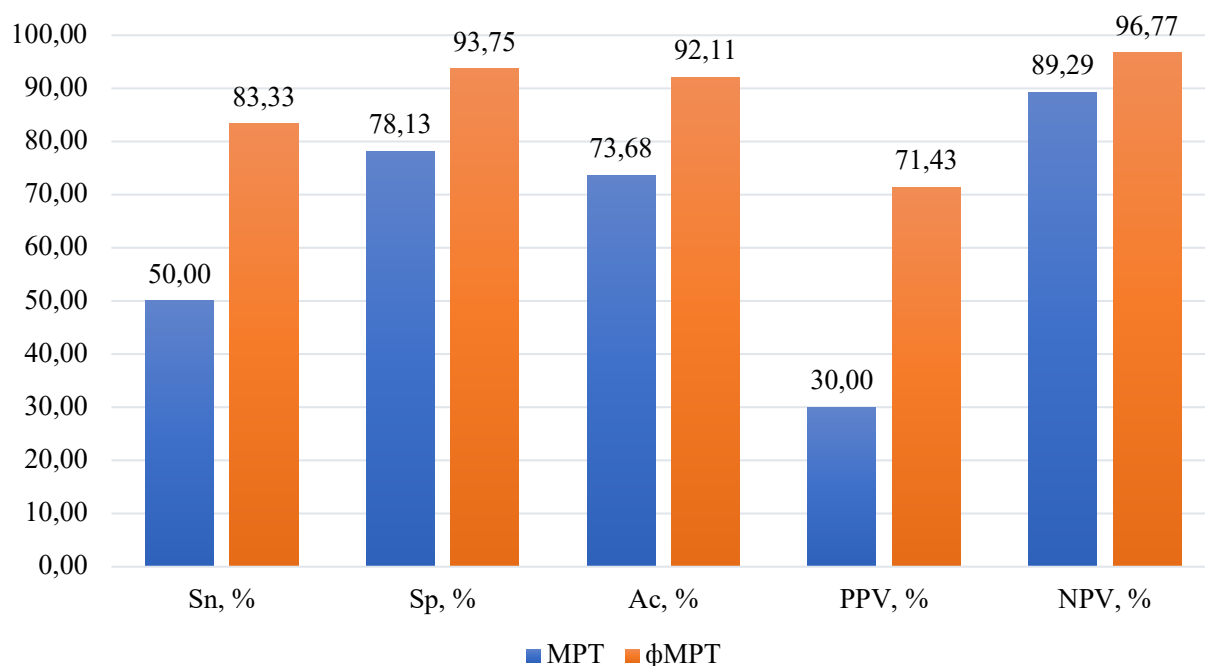


Рисунок 32 – Показатели диагностической эффективности и прогностической ценности МРТ и фМРТ при выявлении частичного разрыва трансплантата ПКС

Диагностическая эффективность МРТ и фМРТ у пациентов с полным разрывом трансплантата ПКС. Для МРТ у пациентов с полным разрывом трансплантата ПКС: TP – 10, FP – 3, TN – 20, FN – 5.

Для фМРТ у пациентов с полным разрывом трансплантата ПКС: TP – 14, FP – 0, TN – 23, FN – 1.

Для МРТ:

- $S_n = 10 / (10+5) \times 100\% = 66,67\%$;
- $S_p = 20 / (20+3) \times 100\% = 86,96\%$;
- $A_c = (10+20) / (10+3+5+20) \times 100\% = 78,95\%$.

Для фМРТ:

- $S_n = 14 / (14+1) \times 100\% = 93,33\%$;
- $S_p = 23 / (23+0) \times 100\% = 100,00\%$;
- $A_c = (14+23) / (14+0+1+23) \times 100\% = 97,37\%$.

Прогностическая ценность МРТ и фМРТ у пациентов с полным разрывом трансплантата ПКС. Для МРТ:

- $PPV = 10 / (10+3) \times 100\% = 76,92\%$;
- $NPV = 20 / (20+5) \times 100\% = 80,00\%$.

Для фМРТ:

- $PPV = 14 / (14+0) \times 100\% = 100,00\%$;
- $NPV = 23 / (23+1) = 95,83\%$.

Диагностическая эффективность и прогностическая ценность МРТ и фМРТ в отношении полного разрыва трансплантата ПКС представлена на Рисунке 33.

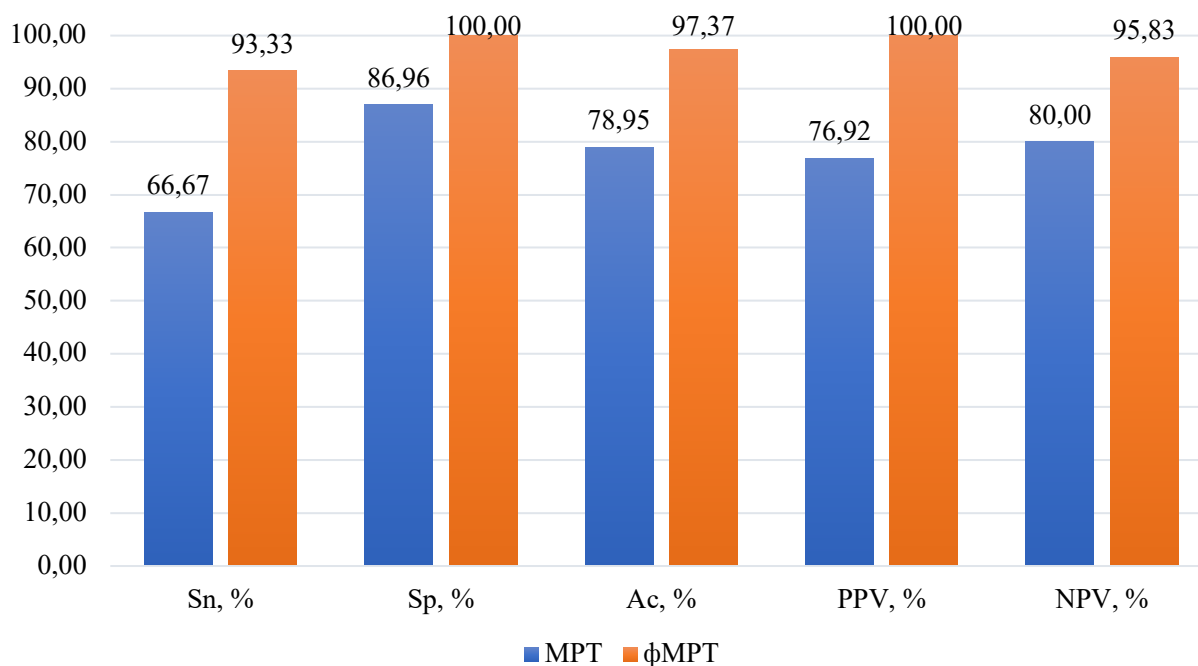


Рисунок 33 – Показатели диагностической эффективности и прогностической ценности MPT и фMPT при выявлении полного разрыва трансплантата ПКС

Чувствительность, специфичность и точность MPT и фMPT в диагностике разрыва трансплантата для каждой степени повреждения и указаны в Таблице 15.

Таблица 15 – Чувствительность, специфичность и точность MPT и фMPT в диагностике разрыва трансплантата ПКС

Диагноз	MPT			фMPT		
	Sn, %	Sp, %	Ac, %	Sn, %	Sp, %	Ac, %
Норма	64,71	80,95	73,68	94,12	95,24	94,74
Частичный разрыв	50,0	78,13	73,68	83,33	93,75	92,11
Полный разрыв	66,67	86,96	78,95	93,33	100,0	97,37

Показатели положительной и отрицательной прогностической ценности результата в диагностике разрыва ПКС указаны в Таблице 16.

Таблица 16 – Показатели положительной и отрицательной прогностической ценности результата MPT и фMPT в диагностике разрыва трансплантата ПКС

Диагноз	MPT		фMPT	
	PPV, %	NPV, %	PPV, %	NPV, %
Норма	73,33	73,91	94,12	95,24
Частичный разрыв	30,00	89,29	71,83	96,77
Полный разрыв	76,92	80,00	100,00	95,83

ГЛАВА 4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

4.1. Методика и протокол функциональной магнитно-резонансной томографии коленного сустава

фМРТ коленного сустава может быть выполнена на любом высокопольном томографе, однако для ее внедрения потребуются работа с программным обеспечением и обучение персонала. Во-первых, необходимо настроить динамическую последовательность с учетом доступности протоколов и специфики программного обеспечения томографа, адаптировав ее к области коленного сустава. При этом необходимо обеспечить минимальное время сбора данных, чтобы качественно визуализировать ПКС при непрерывном движении коленного сустава. Во-вторых, необходимо оптимизировать позиционирование гибких катушек вдоль внутренних и наружных отделов сустава для обеспечения свободы его движений. В-третьих, требуется обучение для верного планирования фМРТ последовательности по оси ПКС, так как из-за блоковидно-вращательного характера коленного сустава геометрический вектор ПКС будет меняться при сгибании.

На сегодняшний день известны несколько методик МРТ для визуализации коленного сустава в движении.

Одним из методов является кино-МРТ или сбор данных по движению по типу кинофазового контраста. Основным недостатком данного метода является значительное время сбора данных для получения МР-изображений, которое составляет несколько минут. Данные особенности требуют от пациента предельной точности в воспроизведении сгибания-разгибания в суставе, что сопровождается серьезными двигательными и ghosting- артефактами, делающими оценку состояния ПКС компромиссной. Также длительное исследование вызывает у пациента боль и утомляемость в травмированном коленном суставе [125].

Другой метод представляет собой псевдодинамический сбор данных, то есть положение сустава фиксируется на определенной фазе сгибания, что занимает много времени и не позволяет оценить биомеханику ПКС в реальном времени [138].

Наиболее перспективным для оценки кинематики сустава может быть сбор данных в реальном времени, позволяющий за несколько секунд оценить весь объем движений без необходимости повторения [206]. Для этого лучше всего подходят ультрабыстрые ИП градиентного и одноимпульсного спинового эха.

MP-последовательности одноимпульсного ультрабыстрого спинового эха (Ultrafast SE) отличает полный сбор k-пространства с построением изображений, после одного возбуждающего 90° импульса. Дополнительное увеличение скорости сбора данных происходит за счет половинного Фурье преобразования [113]. Данные ИП обладают сравнительно большим TR, делая их приближенными к PD-изображениям, что отлично подходит для оценки морфологии и функции ПКС.

Ультрабыстрые градиентные ИП (Ultrafast GRE, SSFP) с углом поворота менее 90° имеют высокое временное разрешение, что позволяет получить изображение за несколько сотен миллисекунд, а весь сустав можно охватить за одно томографирование. К недостаткам данных ИП относится низкое пространственное разрешение и, что более важно, T1-взвешенность полученных изображений, которая ограничивает выявление морфологических изменений крестообразных связок [189].

В научной литературе обсуждается несколько различных способов укладок пациентов для проведения фМРТ коленного сустава. Одни исследователи проводили фМРТ в положении лежа на спине с использованием специального устройства для фиксации катушки [177], другие – в положении пациента лежа на боку, укладывая гибкие катушки на травмированное колено с фиксацией здоровой ногой сверху [208], третьи использовали специальный ортез с сопротивлением для сгибания колена [200].

Методика фМРТ в данной научно-исследовательской работе выполнена в положении пациента лежа на животе, что обеспечивало физиологическое

естественное движение коленного сустава и высокую степень его свободы. Данный способ не требовал дооснащения кабинета МРТ специальными устройствами, фиксаторами и ортезами. В проведенном исследовании у всех здоровых добровольцев и пациентов (100%, n = 130) была визуализирована ПКС до и после пластики. Жалоб и отказов от исследования зафиксировано не было.

При анализе результатов научно-исследовательской работы можно сделать вывод, что стандартная МРТ уступает по информативности фМРТ в оценке состояния как нативной ПКС, так и после ее реконструкции. Также стандартная МРТ не может ответить на важные для планирования оперативного лечения вопросы о функциональном состоянии коленного сустава: пассивной стабилизации и ротационном контроле [25].

фМРТ коленного сустава является перспективным методом диагностики повреждений ПКС до и после пластики. Анализ изображений в движении может помочь в диагностике клинически скрытой нестабильности коленного сустава, выявлении однопучковых, субсиновиальных разрывов ПКС, рубцовых изменений, осложнений после пластики связки.

Ограничением фМРТ является угол сгибания в коленном суставе, предельный градус которого определяется шириной апертуры гентри томографа (60–70 см) и длиной голени человека. Данная методика не позволяет согнуть колено полностью. Однако в проведенном исследовании удалось добиться сгибания коленного сустава в диапазоне до 50–70°, что несколько превышает данные показатели при ходьбе (50–60°). Также фМРТ невозможно выполнить в жестких квадратурных катушках для сустава, препятствующих какой-либо мобильности.

В ходе исследования были получены изображения ПКС в движении на МР-томографах трех наиболее распространенных производителей в России: Siemens (Германия), Philips (Нидерланды), General Electric (США), с напряженностью магнитного поля как 1,5 Тл, так и 3 Тл. Существенных преимуществ у МРТ 3 Тл по сравнению с 1,5 Тл зафиксировано не было, что связано с большим количеством артефактов («ghost-артефакты», размытия, искажения),

нивелирующих преимущество 3 Тл МР-системы в скорости сбора данных и увеличенным в $\sqrt{2}$ раз соотношением сигнал-шум по сравнению с МРТ 1,5 Тл.

Качество получаемых изображений фМРТ и количество артефактов зависело от технологичности программного обеспечения томографа, канальности МР-системы и гибких катушек за счет параллельного сбора данных, быстрых методик заполнения к-пространства, скорости нарастания градиента магнитной индукции, что подтверждается данными литературы [274].

Также в ходе данного исследования оказалось невозможно получить достаточного качества изображения ПКС с жироподавлением в режиме движения в реальном времени из-за существенного увеличения времени сбора данных. ИП с жироподавлением были получены только в псеводинамическом режиме, когда колено зафиксировано в положении сгибания, что соответствует данным литературы [113].

Появление в широком доступе ультрабыстрых спин-эхо ИП, обладающих высоким временным разрешением, хорошим соотношением сигнал-шум и тканевым контрастом позволили создать в данном исследовании универсальный протокол фМРТ для оценки состояния ПКС до и после пластики в движении для любых современных высокопольных МР-томографов (Таблица 17).

Таблица 17 – Протокол функциональной МРТ коленного сустава для визуализации ПКС до и после пластики на томографах разных производителей

МР-томограф Протокол	General Electric, США	Philips, Нидерланды	Siemens, Германия
Положение пациента	Лежа на животе, ногами в гентри	Лежа на животе, ногами в гентри	Лежа на животе, ногами в гентри
Тип катушек	Гибкие многоканальные для суставов	Гибкие многоканальные для суставов	Гибкие многоканальные для суставов
ИП	SS-FSE	SSH-TSE	HASTE
Параллельный сбор данных/коэффициент ускорения	ASSET, HyperBand, HyperSense/ 2–8	SENSE, Compressed SENSE/ 2–8	mSENSE, iPAT/ 2–8
Толщина среза	3–5 мм	3–5 мм	3–5 мм
TR/TE	2000 мс/min	2000 мс/min	2000 мс/min
Время сбора данных	12–16 секунд	12–16 секунд	12–16 секунд

Продолжение Таблицы 17

MP-томограф Протокол	General Electric, США	Philips, Нидерланды	Siemens, Германия
Контраст изображения	PD	PD	PD
Количество фаз за 1 двигательный цикл	8–15	8–15	8–15
Плоскость исследования/ Количество срезов	Косоагиттальная по оси ПКС/ 1–4	Косоагиттальная по оси ПКС/ 1–4	Косоагиттальная по оси ПКС/ 1–4
Примечание: ASSET – Array Coil Spatial Sensitivity Encoding; SENSE – SENSitivity Encoding; mSENSE – modified Sensitivity Encoding; iPAT – integrated Parallel Acquisition Techniques			

4.2. Нормальная магнитно-резонансная анатомия и магнитно-резонансная семиотика повреждения передней крестообразной связки на основе данных функциональной магнитно-резонансной томографии

Результаты проведенного исследования доказали высокую диагностическую эффективность и прогностическую ценность фМРТ при выявлении повреждений ПКС, что стало возможным благодаря изученным и разработанным дополнительным признакам, указывающим на нормальную анатомию и функцию ПКС в различные фазы двигательного цикла, а также дополнительным признакам, указывающим на повреждение ПКС при выполнении фМРТ, которые обобщены в Таблице 18.

Оценку фМРТ-изображений следует начинать с анализа движения коленного сустава в реальном времени, обращая внимания на непрерывность хода ПКС, аномалии ее структуры и плавность движения мыщелков бедренной и большеберцовой костей. Важным фактором верной интерпретации фМРТ при этом будет получение корректных изображений по оси ПКС, чтобы на определенных углах сгибания или разгибания колена не спутать не попавшую в плоскость сканирования связку с разрывом.

Далее необходимо переходить к оценке нормальной анатомии и геометрии волокон ПКС на определенных углах сгибания, устанавливая паузу на кинорежиме. Кроме того, бывает полезно дополнить протокол фМРТ псевродинамическим режимом с углом сгибания коленного сустава 45° или более, так как в режиме

высокого пространственного разрешения и жироподавления отлично визуализируется двухпучковая анатомия ПКС и смена фаз натяжения-расслабления ПМ и ЗЛ пучков (Рисунок 16).

Таблица 18 – Дополнительные МР-признаки нормы и разрыва ПКС на основе данных фМРТ

МР-признаки	Нормальная ПКС	Разрыв ПКС
Анатомия и целостность ПКС	Прослеживается на всем протяжении, непрерывный ход волокон, нет дефектов при сгибании и разгибании сустава	Появление дефектов, нарушение непрерывности хода волокон связки в любую фазу двигательного цикла
Изометрическая функция 2 пучков связки	При сгибании активен ПМ пучок, а ЗЛ расслаблен. При разгибании натягивается ЗЛ пучок, а ПМ расслаблен	Нет непрерывного натяжения ПКС в движении за счет нарушения смены активности пучков, снижение натяжения связки, дефекты или изменения хода волокон одного из пучков
Геометрия ПКС в движении	Физиологические изгибы кзади при разгибании и кпереди при сгибании	При сгибании связка не меняет своего положения, S-образная или неправильная форма связки при сгибании (часто – при разрыве ЗЛ пучка), нарушение плавности смены положения ПКС в движении, несоответствие ориентации волокон ПКС фазе двигательного цикла
Биомеханика бедренной и большеберцовой костей	Большеберцовая кость расположена кзади от передней кортикальной пластинки бедренной кости при возврате сустава в положение разгибания	Переднее смещение большеберцовой кости при возврате коленного сустава в положение разгибания – признак характерен для полного разрыва ПКС

К непрямым признакам полного разрыва ПКС на фМРТ следует отнести переднее смещение большеберцовой кости относительно передней кортикальной пластинки бедренной кости при возврате сустава в положение разгибания. По сути, этот признак указывает на переднезаднюю нестабильность в коленном суставе, которую визуализируют при клинических тестах Лахмана и ПВЯ, и сигнализирует о полной несостоятельности ПКС по выполнению ее основной функции (Рисунок 18).

К прямым признакам разрыва ПКС на фМРТ относится появление дефектов, нарушение непрерывности хода волокон связки в движении. Этот признак позволяет выявить скрытые повреждения ПКС во всей амплитуде движений, которые не видны при статичном положении связки в состоянии полного разгибания (Рисунок 18).

Другим прямым признаком разрыва ПКС на фМРТ является утрата связкой физиологических изгибов кзади при разгибании и кпереди при сгибании. Волокна неповрежденной ПКС имеют определенную траекторию движения: при разгибании связка имеет небольшой прогиб или плавный изгиб кзади, по мере сгибания коленного сустава происходит выпрямление волокон ПКС, при угле сгибания в 40–45° и более происходит физиологический изгиб ПКС кпереди (Рисунок 17). При повреждении ПКС происходит нарушение натяжения волокон ПМ и ЗЛ пучков, из-за чего при сгибании связка может не менять своей геометрии, принимать атипичную S-образную форму (особенно при разрыве ЗЛ пучка) или в отдельные моменты движения иметь нетипичную ориентацию волокон (Рисунок 19).

Смену фаз изометрического сокращения и расслабления двух пучков связки и нарушение этого процесса можно увидеть при анализе изображений в фазе полного разгибания и максимального сгибания сустава (угол около 50–70° в зависимости от апертуры гентри и длины голени пациента), также эффективно для этого признака оказывается проведение псеводинамического последовательности в режиме PD FS в состоянии максимального сгибания (Рисунок 18).

Учитывая высокую диагностическую эффективность фМРТ в данном диссертационном исследовании, при проведении аналогичных функциональных исследований коленного сустава для повышения точности диагностики могут быть использованы перечисленные в данной главе дополнительные прямые и косвенные признаки разрыва ПКС в движении.

4.3. Нормальная магнитно-резонансная анатомия и магнитно-резонансная семиотика повреждения трансплантата передней крестообразной связки на основе данных функциональной магнитно-резонансной томографии

Высокие показатели точности и достоверности фМРТ, полученные по результатам данного исследования, подтвердили диагностическую значимость и актуальность разработанных признаков нормальной анатомии трансплантата ПКС в движении, а также дополнительных признаков его повреждения на основе анализа его функции и биомеханики сустава в целом при выполнении фМРТ.

Следует отметить, что нижеперечисленные МР-признаки повреждения трансплантата ПКС схожи с таковыми для нативной ПКС: нарушение изометрического натяжения трансплантата во время флексии-экстензии; переднее смещение большеберцовой кости в конечной точке разгибания сустава; дефекты или нарушение непрерывности хода волокон в движении; изменение физиологической геометрии трансплантата при сгибании и разгибании.

Отдельно стоит подчеркнуть, что оценка изометрической работы трансплантата сложнее, так как в отличие от нативной ПКС, трансплантат в зависимости от выбранного материала для пластики может состоять от 1 (из собственной связки надколенника) до 6 и даже 8 пучков (из сухожилий подколенных сгибателей, малоберцовых мышц, четырехглавой мышцы). Кроме того, при неправильном положении костных каналов может наблюдаться нестабильность в коленном суставе и переднее смещение большеберцовой кости без признаков разрыва трансплантата ПКС (Рисунок 34).

Также актуальным остается вопрос, что считать анатомической пластикой ПКС и как оценивать результаты такой пластики. Из-за того, что зоны прикреплений волокон ПКС к бедренной и большеберцовой костям (футпринты) больше, чем формируемые каналы при реконструкции ПКС, а также возникающих при артроскопии сложностей доступа, реальное положение канала в кости может идти по переднему краю футпринта, в его центральных отделах или по заднему краю [2].

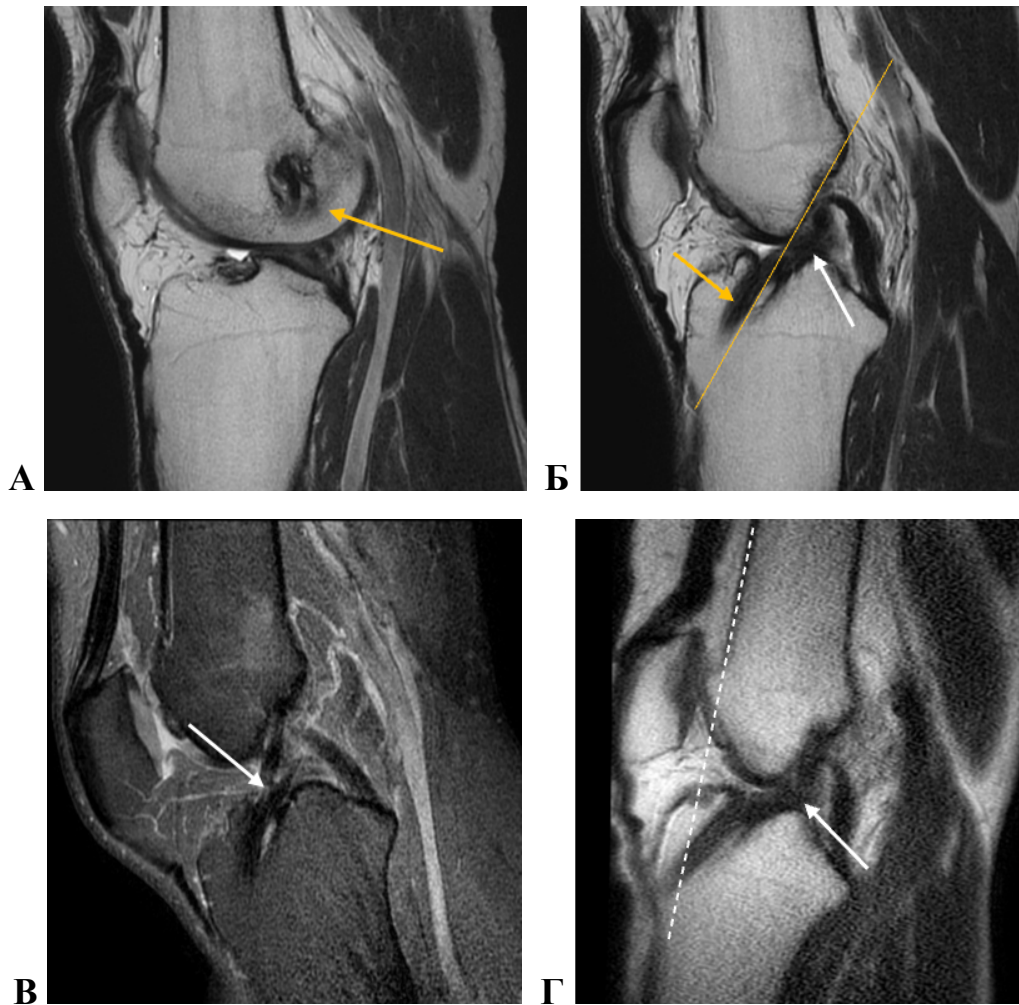


Рисунок 34 – Пациент Р., 25 лет. Диагноз: подозрение на разрыв трансплантата ПКС. МРТ (А, Б), фМРТ (В, Г). Белой стрелкой показан трансплантат ПКС, пунктирная линия проведена через переднюю кортикальную пластинку бедренной кости, сплошная линия – через передние отделы крыши бедренной вырезки (линия Blumensaat).

А, Б: на МРТ в кососагиттальной плоскости в режиме T2 трансплантат ПКС прослеживается, натяжение его снижено – изменения расценены как частичный разрыв. Отмечается атипичное низкое, переднее расположение канала в бедренной кости, канал в большеберцовой кости расположен кпереди от линии Blumensaat (оранжевые стрелки). В, Г: на фМРТ в положении сгибания на 25–30° в режиме PD FS (В) и разгибания в режиме SS-FSE (Г) трансплантат ПКС имеет однородную гипоинтенсивную структуру, прослеживается на всем протяжении, натянут при сгибании на 25–30° – признаки неповрежденного трансплантата ПКС. При этом отмечается подвывих большеберцовой кости кпереди при разгибании сустава за счет неправильного положения костных каналов и формированием нестабильности без разрыва трансплантата ПКС (Г)

По результатам проведенных артроскопических и фМРТ исследований, с учетом анализа жалоб пациентов на проявления нестабильности или ограничение

подвижности сустава после пластики ПКС, совместно с травматологами-ортопедами был предложен дополнительный признак анатомической реконструкции ПКС на фМРТ. Он заключается в совпадении геометрии работы трансплантата в движении с нативной ПКС (Рисунок 35).

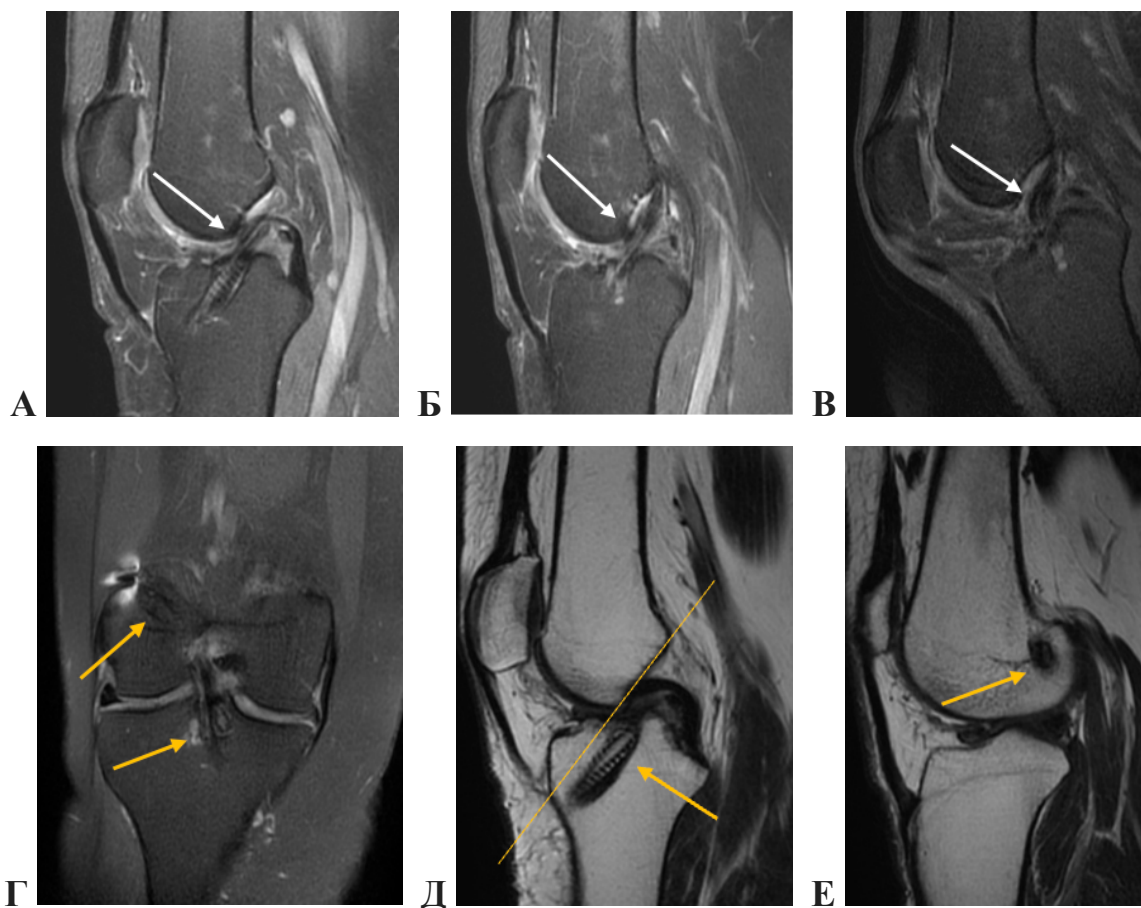


Рисунок 35 – Пациентка М., 38 лет. Диагноз: подозрение на разрыв трансплантата ПКС. МРТ (А, Б, Г, Д, Е), фМРТ (В). Белой стрелкой показан трансплантат ПКС, сплошная линия – через передние отделы крыши бедренной вырезки (линия Blumensaat).

А, Б: на МРТ в сагиттальной плоскости в режиме PD FS трансплантат ПКС прослеживается, натяжение его сохранено, МР-сигнал достаточно однородный, в положении разгибания отмечается небольшой изгиб кзади как у нативной ПКС.

В: на фМРТ в режиме PD FS в положении сгибания на 45° трансплантат ПКС имеет достаточно однородную гипоинтенсивную структуру, прослеживается на всем протяжении, отмечается его физиологический изгиб кпереди как у нативной ПКС.

Г, Д, Е: на МРТ во фронтальной плоскости в режиме PD FS (Г) и в сагиттальной плоскости (Д, Е) в режиме T2 WI отмечается правильное положение костных каналов: во фронтальной плоскости бедренный – на 10–11 часах, большеберцовый – 7 часах, в сагиттальной плоскости бедренный – идет на 2–3 мм кзади от кортикальной пластинки заднего края мыщелка, большеберцовый – сразу кзади от линии Blumensaat

Дополнительные МР-признаки нормы и разрыва трансплантата ПКС на основе данных фМРТ обобщены в Таблице 19.

Таблица 19 – Дополнительные МР-признаки нормы и разрыва трансплантата ПКС на основе данных фМРТ

МР-признаки	Нормальный трансплантат	Разрыв трансплантата
Анатомия и целостность трансплантата	Прослеживается на всем протяжении, непрерывный ход волокон, нет дефектов при сгибании и разгибании сустава	Появление дефектов, нарушение непрерывности хода волокон связки в любую фазу двигательного цикла
Изометрическая функция трансплантата	Сохранение натяжения трансплантата во все фазы двигательного цикла	Нет непрерывного натяжения трансплантата в движении. Примечание: при атипичном положении костных каналов может быть отсутствие натяжения трансплантата без признаков его разрыва
Геометрия трансплантата в движении	Изгибы трансплантата кзади при разгибании и кпереди при сгибании. В отличие от ПКС изгибы менее выражены. Примечание: при анатомической реконструкции ПКС геометрия волокон трансплантата должна быть идентична нативной ПКС	При сгибании трансплантат не меняет своего положения, S-образная, изогнутая форма трансплантата, несоответствие ориентации волокон трансплантата фазе двигательного цикла
Биомеханика бедренной и большеберцовой костей	Большеберцовая кость расположена кзади от передней кортикальной пластинки бедренной кости при возврате коленного сустава в положение разгибания	Патологическое переднее смещение большеберцовой кости при возврате коленного сустава в положение разгибания. Примечание: при неправильном положении костных каналов может быть переднезадняя нестабильность сустава без разрыва трансплантата

Учитывая высокую диагностическую эффективность фМРТ в данном диссертационном исследовании, при проведении аналогичных функциональных исследований коленного сустава для повышения точности диагностики могут быть использованы перечисленные в данной главе дополнительные прямые и косвенные признаки разрыва трансплантата ПКС в движении.

4.4. Сравнение диагностической эффективности и прогностической ценности магнитно-резонансной томографии и функциональной магнитно-резонансной томографии у пациентов с подозрением на повреждение передней крестообразной связки коленного сустава

В научной литературе изучались возможности фМРТ для визуализации коленного сустава. N.M. Brisson et al. (2022) для выполнения фМРТ использовали специальные фиксаторы колена, что привело к отсутствию свободных активных движений в суставе, а также вызвало ограничения сгибания в коленном суставе до 35° [52]. Другие исследователи посредством фМРТ визуализировали нестабильность менисков или пателлофemorального сустава [112, 266]. Однако никто из исследователей не оценивал диагностическую эффективность фМРТ при повреждениях ПКС.

В данном исследовании была разработана методика фМРТ коленного сустава для оценки состояния ПКС. У пациентов с подозрением на повреждение ПКС помимо МРТ было выполнено фМРТ коленного сустава [30, 41, 42, 43], что привело к повышению чувствительности, специфичности и точности диагностики повреждения ПКС, а также показателей PPV и NPV (Таблицы 13 и 14).

Так, прирост показателей Sn, Sp, Ac фМРТ по сравнению с МРТ для каждой степени повреждения ПКС составил соответственно: 28%, 11,4%, 18,33% для нормальной ПКС; 12,5%, 23,1%, 21,7% – для частичного разрыва; 33,3%, 3%, 16,7% – для полного разрыва.

Наибольшие сложности в МР-диагностике, по-прежнему, связаны с частичными разрывами ПКС, которые встречаются до 30% всех случаев повреждений [257]. Небольшие повреждения ПКС (менее 25% волокон) имеют благоприятный прогноз в отношении самостоятельного заживления. Частичные разрывы, вовлекающие 50–75% ПКС, или сопровождающиеся разрывом одного из двух пучков, демонстрируют высокий риск прогрессии и полного разрыва в будущем [62]. Определение процента повреждения волокон ПКС по данным МРТ является сложной задачей [57]. Этим объясняется низкая точность диагностики

(Sn 40–77%, Sp 51–97%) частичных разрывов ПКС на МРТ [196]. Сложной задачей для МРТ остается диагностика полного субсиновиального разрыва, когда ПКС прослеживается на всем протяжении, наблюдается лишь ее отек и дегенерация волокон, места фиксации к костям не изменены, но при артроскопии определяют полный разрыв связки [196].

фМРТ имеет преимущество перед МРТ в выявлении субсиновиальных разрывов ПКС, дифференцировании частичных и полных разрывов. Повышение диагностической эффективности для фМРТ заложено в сам способ проведения методики: структура ПКС оценивается в диапазоне сгибания от 180° до 110°, а не только при полном разгибании коленного сустава.

Возможность визуализации нативной ПКС в движении в ходе полипозиционной фМРТ позволяет лучше оценить морфологическую структуру ПКС, траекторию движения ПМ и ЗЛ пучков связки, фазы их поочередного изометрического натяжения, исключить или подтвердить переднюю нестабильность большеберцовой кости.

Из-за этого на фМРТ, по сравнению с МРТ, чаще и с большей уверенностью происходит верная трактовка каждой степени разрыва ПКС (повышение диагностического согласия с артроскопией на 0,41, среднего уровня достоверности верного диагноза на 0,64), что влияло на выбор тактики ведения пациента в пользу артроскопической пластики ПКС или медикаментозно-реабилитационного лечения.

фМРТ существенно повышала уверенность в верном диагнозе состояния ПКС по сравнению с МРТ (увеличение PPV на 19,6% для нормы, на 36,2% – для частичного разрыва, на 23,1% – для полного разрыва).

NPV для фМРТ оказался выше, чем для МРТ на 17,5% для интактной ПКС и на 20,31% для полного разрыва, то есть фМРТ обладала отличной отрицательной предсказательной ценностью, и отрицательный результат фМРТ практически исключал диагноз нормы или полного разрыва ПКС.

Графическая оценка точности МРТ и фМРТ проводилась путем построения характеристических кривых (ROC-кривых) для каждой степени повреждения ПКС с расчетом площади под кривой (Area Under the Curve, AUC).

Для оценки эффективности каждого из методов использовали следующую классификацию:

- $0,8 \leq AUC \leq 1,0$ – метод работает превосходно;
- $0,6 \leq AUC < 0,8$ – метод работает хорошо;
- $0,5 < AUC < 0,6$ – метод работает удовлетворительно;
- $AUC \leq 0,5$ – метод не работает.

На Рисунках 36–38 представлены характеристические кривые точности диагностики каждой степени повреждения ПКС (норма, частичный разрыв, полный разрыв) для методов МРТ и фМРТ.

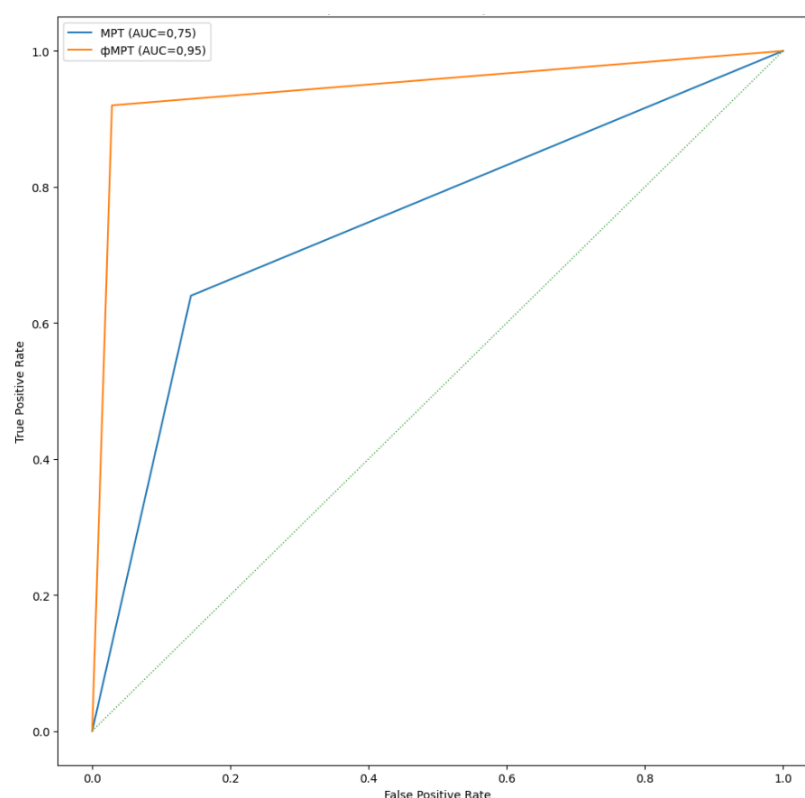


Рисунок 36 – ROC-кривая точности диагностики нормальной ПКС для МРТ и фМРТ. Значение AUC для метода МРТ: 0,75, для метода фМРТ: 0,95

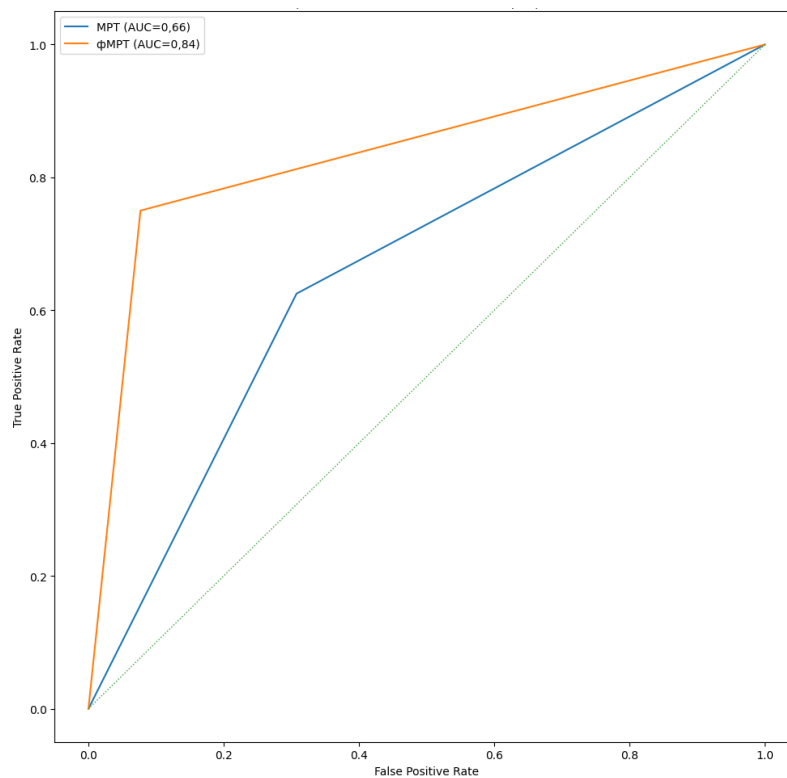


Рисунок 37 – ROC-кривая точности диагностики частичного разрыва ПКС для МРТ и фМРТ. Значение AUC для метода МРТ: 0,66, для метода фМРТ: 0,84

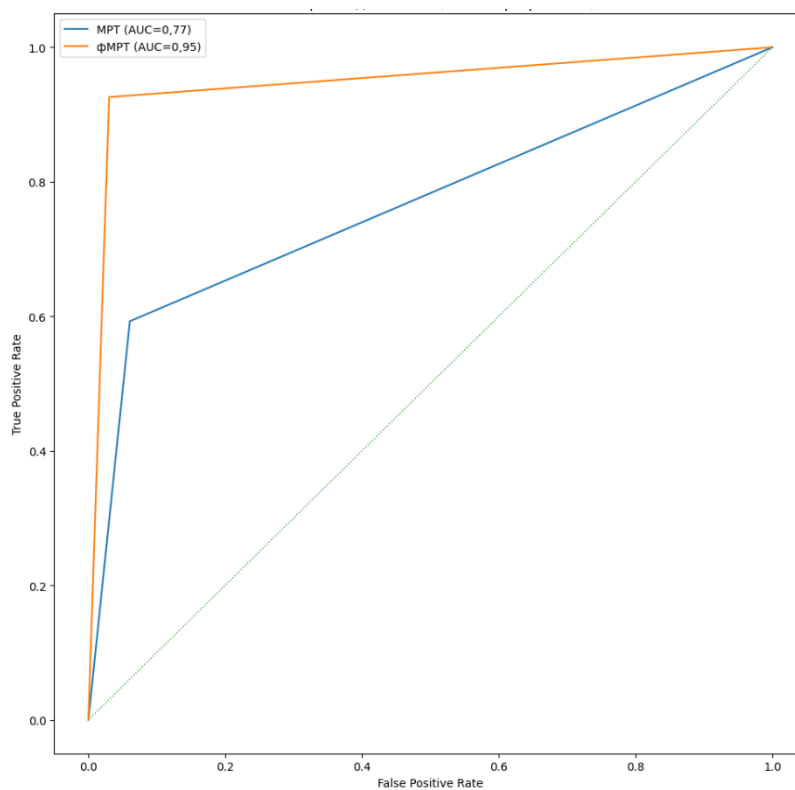


Рисунок 38 – ROC-кривая точности диагностики полного разрыва ПКС для МРТ и фМРТ. Значение AUC для метода МРТ: 0,77, для метода фМРТ: 0,95

Таким образом, метод фМРТ показал превосходные показатели для всех степеней повреждения ПКС, тогда как метод МРТ – хорошие показатели (AUC для фМРТ на 0,2 выше для нормы, на 0,18 для частичного и на 0,18 для полного разрыва ПКС по сравнению с МРТ), что позволяет использовать фМРТ в качестве предпочтительного метода-классификатора при подозрении на повреждение ПКС коленного сустава.

фМРТ ($k=0,838$) также значительно увеличивает диагностическое согласие с артроскопией по сравнению с МРТ ($k=0,430$) и повышает среднюю достоверность правильного диагноза при оценке ПКС (4,5 для фМРТ и 3,87 для МРТ).

К ограничениям данного исследования следует отнести особенности сформированной выборки в виде большого количества клинически сложных случаев с сомнительными результатами клинических тестов, ограниченного числа пациентов с частичным разрывом ПКС, а также задержками в сроках артроскопического вмешательства после проведенных МРТ и фМРТ исследований, что могло повлиять на объективность результатов стандартного МРТ.

4.5. Сравнение диагностической эффективности и прогностической ценности магнитно-резонансной томографии и функциональной магнитно-резонансной томографии у пациентов с подозрением на повреждение трансплантата передней крестообразной связки коленного сустава

Биомеханика трансплантата ПКС *in vivo*, согласно данным современной научной литературы, изучена крайне слабо. Это касается всех модальностей лучевой диагностики, включая МРТ, а также инвазивных артроскопических техник.

В нескольких исследованиях изучались возможности фМРТ для оценки самой ПКС. Однако D. Guenoun et al. (2017) делали это псевдодинамическом способом, без оценки реальной кинематики ПКС в реальном времени [50]. В другом исследовании при проведении стресс-МРТ отсутствовало естественное, физиологическое движение ПКС, так как для оценки ее целостности применяли

специализированный артрометр, который измерял лишь переднее смещение большеберцовой кости [259].

Единственный на сегодняшний момент систематический обзор по методике фМРТ коленного сустава был посвящен актуальным ИП и техническим параметрам томографирования, однако его авторы не оценивали диагностическую эффективность предложенных методик на пациентах с разрывом ПКС и ее трансплантата [113].

В данной научно-исследовательской работе была разработана универсальная методика фМРТ коленного сустава, которая была проведена пациентам после пластики ПКС с подозрением на повторный разрыв [30, 41, 42, 43]. Результаты исследования продемонстрировали повышение диагностической эффективности и прогностической ценности фМРТ по сравнению с МРТ в оценке состояния трансплантата ПКС (Таблицы 15 и 16).

Так, прирост показателей Sn, Sp, Ac фМРТ по сравнению с МРТ для каждой степени повреждения трансплантата ПКС составил соответственно: 29,4%, 14,2%, 21% для интактного трансплантата; 33,3%, 15,7%, 18,4% – для частичного разрыва; 26,6%, 13%, 18,4% – для полного разрыва.

Повышение диагностической эффективности для фМРТ заложено в сам способ проведения методики: структуру трансплантата оценивают в диапазоне сгибания от 180° до 110°, а не только при полном разгибании; в движении изучают траекторию движения трансплантата, а также бедренной и большеберцовой костей, что критично для верификации скрытых повреждений и нестабильности в коленном суставе.

При интерпретации постоперационных МРТ после пластики ПКС возникают традиционные сложности, связанные с артефактами магнитной восприимчивости от ферромагнитных фиксаторов, затрудняющих оценку центральных отделов сустава в одной статичной позиции. Кроме того, необходимо учитывать вид трансплантата, положение костных каналов, срок с момента пластики ПКС для верной трактовки повреждения трансплантата ПКС, что непросто осуществить в рамках стандартного МРТ [123].

Возможность визуализации реконструированной ПКС в движении в ходе полипозиционной фМРТ позволяет лучше оценить морфологическую структуру трансплантата, корректность позиции костных каналов, зафиксировать импинджмент или нестабильность в реальном времени, оценить влияние артрофиброза на функцию сустава.

Из-за этого на фМРТ, по сравнению с МРТ, чаще и с большей уверенностью происходит верная трактовка каждой степени разрыва трансплантата ПКС (повышение диагностического согласия с артроскопией на 0,444, среднего уровня достоверности верного диагноза на 0,97), что повлияло на выбор тактики ведения пациента в пользу ревизионной операции или медикаментозно-реабилитационного лечения.

фМРТ существенно повышала уверенность в верном диагнозе состояния трансплантата ПКС по сравнению с МРТ (увеличение PPV на 20,8% для нормы, на 41,8% – для частичного разрыва, на 23,1% – для полного разрыва).

NPV для фМРТ оказался выше, чем для МРТ на 21,3% для неповрежденного трансплантата ПКС и на 15,8% для полного разрыва, то есть фМРТ обладала отличной отрицательной предсказательной ценностью, и отрицательный результат фМРТ практически исключал диагноз нормы или полного разрыва трансплантата.

Графическую оценку точности МРТ и фМРТ проводили путем построения характеристических кривых (ROC-кривых) для каждой степени повреждения трансплантата ПКС с расчетом площади под кривой (AUC).

На Рисунках 39–41 представлены характеристические кривые точности диагностики каждой степени повреждения трансплантата ПКС (норма, частичный разрыв, полный разрыв) для методов МРТ и фМРТ.

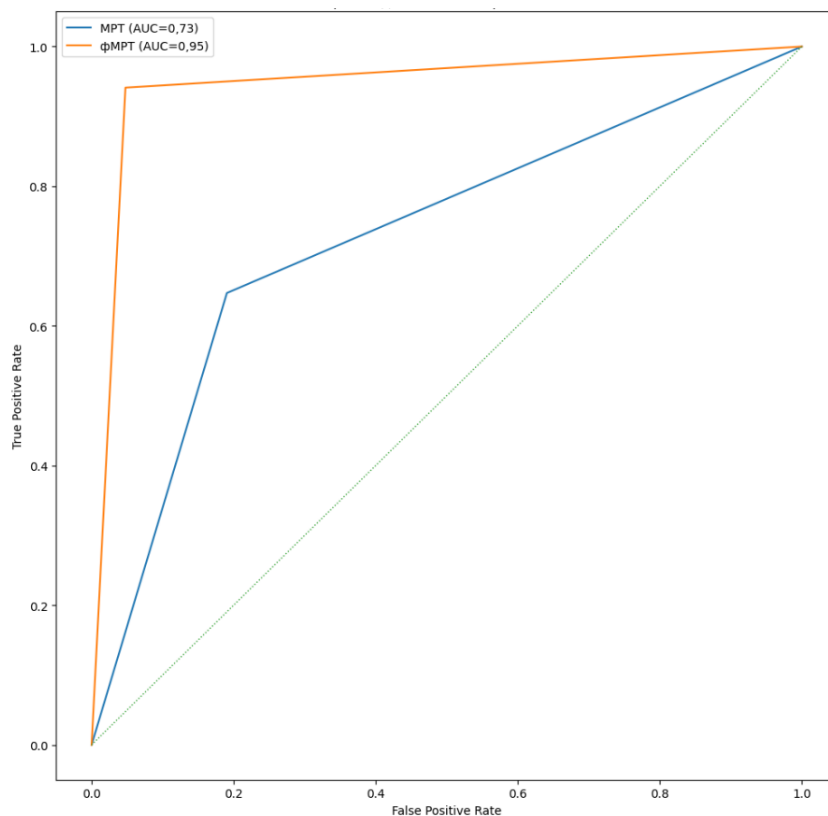


Рисунок 39 – ROC-кривая точности диагностики нормального трансплантата ПКС для МРТ и фМРТ. Значение AUC для метода МРТ: 0,73, для метода фМРТ: 0,95

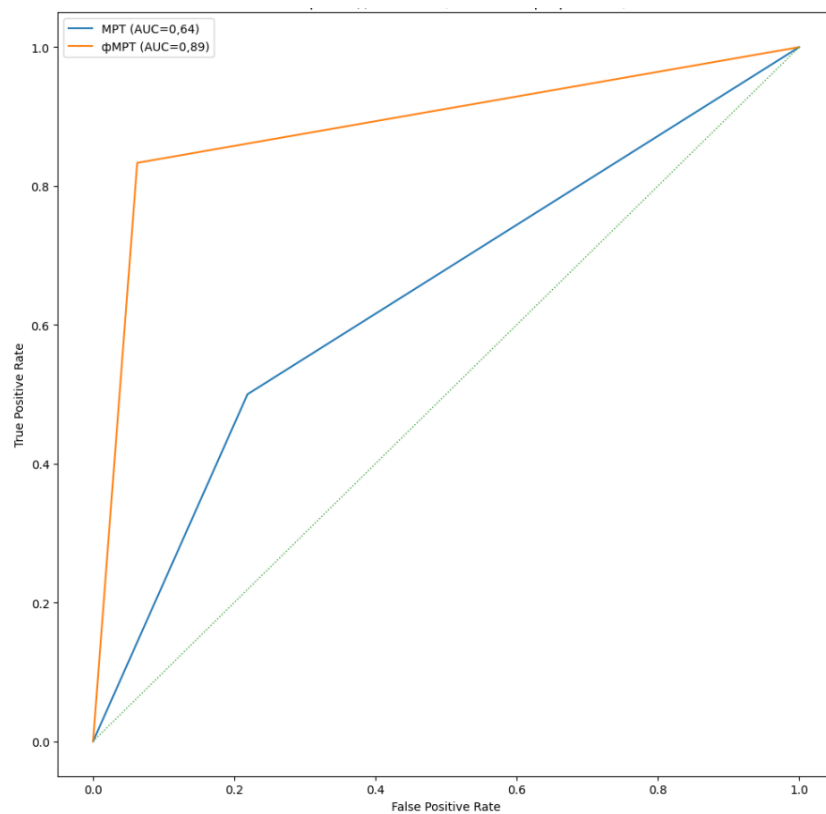


Рисунок 40 – ROC-кривая точности диагностики частичного разрыва трансплантата ПКС для МРТ и фМРТ. Значение AUC для метода МРТ: 0,64, для метода фМРТ: 0,89

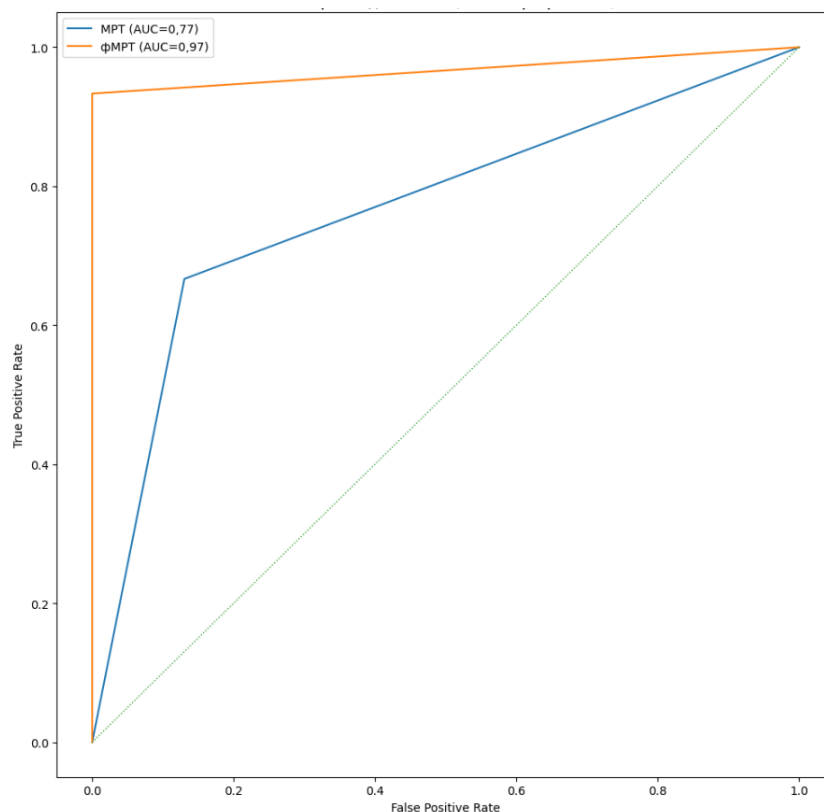


Рисунок 41 – ROC-кривая точности диагностики полного разрыва трансплантата ПКС для МРТ и фМРТ. Значение AUC для метода МРТ: 0,77, для метода фМРТ: 0,97

Таким образом фМРТ показала превосходные показатели для всех степеней повреждения трансплантата ПКС, тогда как МРТ – хорошие показатели (AUC для фМРТ на 0,22 выше для нормы, на 0,25 для частичного и на 0,20 для полного разрыва ПКС по сравнению с МРТ), что позволяет использовать фМРТ в качестве предпочтительного метода-классификатора при подозрении на повторный разрыв ПКС после пластики.

фМРТ ($k=0,874$) также значимо увеличивала диагностическое согласие с артроскопией по сравнению с МРТ ($k=0,430$) и среднюю достоверность правильного диагноза при оценке трансплантата ПКС (4,6 для фМРТ и 3,63 для МРТ).

К ограничениям проведенного исследования следует отнести особенности сформированной выборки в виде большого количества клинически сложных случаев с сомнительными результатами клинических тестов, задержками в сроках артроскопии после проведенных МРТ и фМРТ исследований.

Также в исследовании не рассматривались особенности разных типов трансплантатов ПКС и видов их фиксации.

4.6. Алгоритм лучевого обследования пациентов с подозрением на повреждение передней крестообразной связки коленного сустава и трансплантата передней крестообразной связки коленного сустава

Современный алгоритм обследования пациентов с подозрением на повреждение ПКС до и после пластики базируется на «золотых стандартах» в лучевой диагностике и травматологии-ортопедии. Он предусматривает физикальное обследование с изучением жалоб, обязательным проведением клинических тестов (тест Лахмана, ПВЯ, pivot shift или поворотного сдвига, lever sign или симптом рычага) и МРТ коленного сустава по классической методике [17]. Результаты данного научного исследования позволяют модифицировать текущий клиничко-диагностический алгоритм и включить в него фМРТ для более эффективной оценки степени повреждения ПКС или трансплантата, особенно при неоднозначной клинической или инструментальной картине.

Предложенный клиничко-диагностический алгоритм обследования пациентов с подозрением на повреждение ПКС коленного сустава (Рисунок 42) и трансплантата ПКС коленного сустава (Рисунок 43) с учетом возможностей фМРТ сокращает количество диагностических ошибок и позволяет выбрать оптимальную стратегию лечения.

Исходя из представленных алгоритмов, фМРТ целесообразно использовать как метод выбора у всех пациентов со слабоположительными или сомнительными результатами клинических тестов при подозрении на повреждение ПКС или трансплантата ПКС. В случае убедительных и однозначных результатов клинических тестов (отрицательных или резко положительных) фМРТ рекомендована к проведению при расхождении с данными стандартного МРТ, а также при предполагаемом диагнозе «частичный разрыв» по данным стандартного МРТ. Это связано с верифицированной в ходе исследования более

высокой диагностической эффективностью и прогностической ценностью положительного и отрицательного результата фМРТ по сравнению с МРТ в детекции «сложных» разрывов ПКС и трансплантата – частичных, субсиновиальных, возможностью выявления скрытых повреждений ПКС и трансплантата в движении, а также более уверенного дифференцирования неповрежденных ПКС и трансплантата за счет оценки аномалий биомеханики сустава и геометрии нативной связки и донорских сухожилий в различные фазы двигательного цикла.

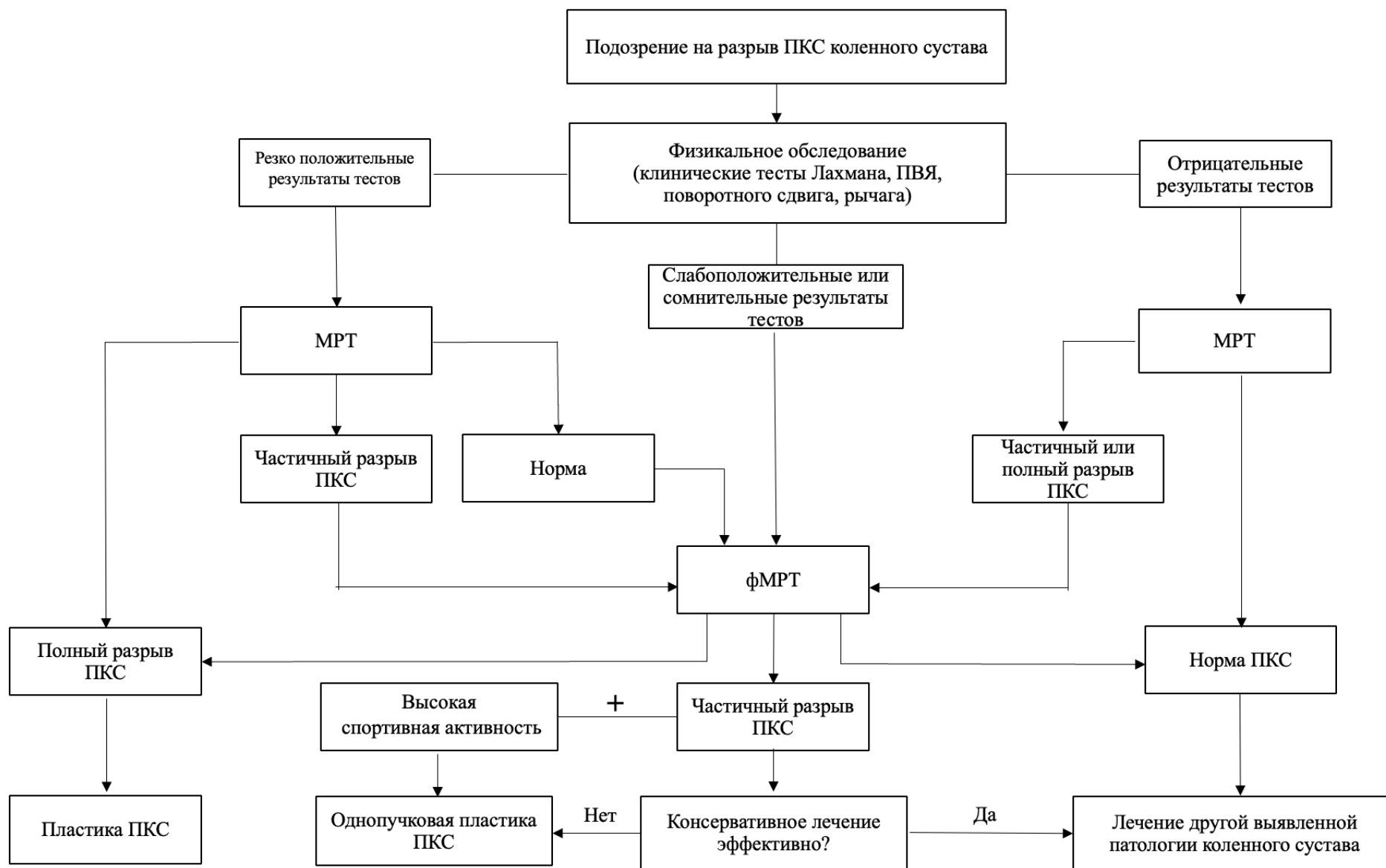


Рисунок 42 – Клинико-диагностический алгоритм обследования пациентов с подозрением на повреждение ПКС коленного сустава

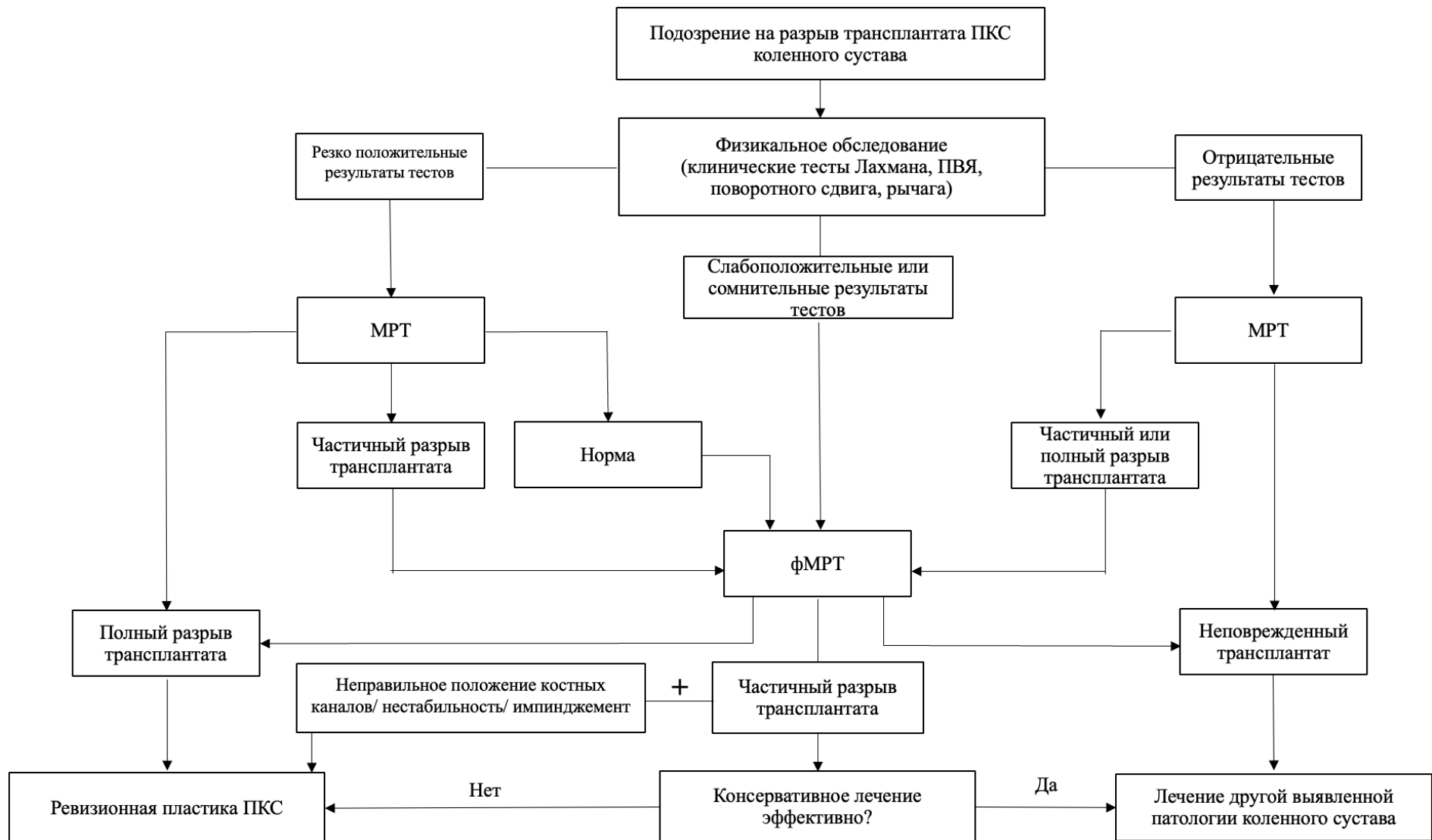


Рисунок 43 – Клинико-диагностический алгоритм обследования пациентов с подозрением на повреждение трансплантата ПКС коленного сустава

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

ПКС является самой травмируемой связкой коленного сустава, составляя до 50% всех случаев. Ежегодно на 100 000 населения от 29 до 38 человек сталкиваются с новым разрывом ПКС [187]. Количество травм сустава, сопряженных с разрывом ПКС, также ежегодно растет из-за популяризации сложнокоординационных видов спорта и активного отдыха.

Разрывы ПКС чаще происходят у спортсменов, молодых и пожилых людей, ведущих активный образ жизни. Таким образом, своевременная диагностика и лечение повреждений крестообразных связок является социально значимой задачей, так как напрямую влияет на образ жизни и даже трудоспособность таких пациентов [32].

Одной из актуальных проблем современной диагностики ПКС до и после пластики остается неинвазивная оценка стабильности коленного сустава (ротационной и переднезадней). Визуализация нестабильности в виде нарушения биомеханики напрямую коррелирует с целостностью ПКС или ее трансплантата.

На сегодняшний день «золотым стандартом» лучевой диагностики внутренних структур коленного сустава считается МРТ. МРТ широко применяется в клинической практике, на основании результатов МРТ о целостности ПКС травматологи принимают решение о проведении операции или консервативного лечения коленного сустава. Исходя из литературных данных, наблюдается значительная вариабельность диагностической эффективности МРТ в выявлении разрывов ПКС, а именно Sn от 63% до 100%, Sp от 68% до 100% [242]. Это объясняется как сложностями положения и строения связки (кососагиттальный ход, двухпучковая структура), так и особенностями классического МРТ коленного сустава, оценивающего морфологию крестообразных связок в статике, игнорируя функцию связок в движении и биомеханику сустава в целом [202].

Главной задачей врачей-травматологов при травме коленного сустава является восстановление его трех ведущих функций, а именно двигательной (сгибание/разгибание/вращение нижней конечности), опорной и стабилизирующей

(резистентность к чрезмерному смещению голени вперед, назад и в стороны). Поэтому появление в широком доступе неинвазивной методики, предоставляющей функциональную информацию о состоянии внутренних структур и биомеханике коленного сустава крайне востребовано, так как напрямую определяет парадигму лечения в пользу артроскопии или консервативного ведения и реабилитации [36].

К функциональным методикам лучевой диагностики для оценки кинематики коленного сустава относятся рентгеноскопия, УЗИ, КТ и МРТ. К ограничениям рентгеноскопии и КТ при этом относится невозможность непосредственной визуализации крестообразных связок из-за низкого мягкотканного контраста, а также лучевая нагрузка на пациента из-за ионизирующего излучения. Из-за низкого акустического сигнала от центральных отделов коленного сустава УЗИ также имеет ограниченные возможности при визуализации ПКС [11].

фМРТ коленного сустава с одной стороны обладает достоинствами классической МРТ в виде хорошей детализации крестообразных связок на изображениях, а с другой позволяет в режиме реального времени получить информацию о биомеханике сустава, проследить анатомию и геометрию работы ПКС в разных фазах флексии-экстензии, определить нестабильность [113].

Одним из дискуссионных вопросов в научной литературе относительно фМРТ в настоящее время является выбор оптимальных технических параметров для оценки биомеханики коленного сустава. Сложности внедрения такой функциональной методики в широкую диагностическую практику связаны с двумя причинами: во-первых, это отсутствие предустановленных ИП в программное обеспечение МР-томографов для визуализации опорно-двигательного аппарата и, во-вторых, отсутствие клинической и научной базы для диагностики заболеваний суставов в движении [114].

В связи с этим, целью данной научно-исследовательской работы была разработка методики и протокола фМРТ коленного сустава для оценки состояния ПКС и ее трансплантата в движении на МР-томографах различных производителей, с шириной апертуры гентри 60 см и 70 см и напряженностью магнитного поля 1,5 Тл и 3 Тл. Актуальными задачами при этом являлись оценка диагностической

эффективности и прогностической ценности фМРТ в выявлении патологии ПКС до и после пластики, сравнение результатов с МРТ и артроскопией, а также изучение и разработка нормальной лучевой анатомии и МР-семиотики повреждений ПКС и ее трансплантата в движении.

Исходя из вышеперечисленного, был разработан и реализован двухэтапный многоцентровой дизайн исследования.

На первом этапе для решения целей и задач по разработке методики и протокола фМРТ с 2022 по 2024 гг. было проведено обследование 32 здоровых добровольцев на базе четырех медицинских центров. В выборку были включены здоровые добровольцы без травм и операций на коленном суставе в анамнезе, а также без жалоб и клинических признаков повреждения ПКС. Возраст здоровых добровольцев находился в интервале от 21 до 81 года с достаточно равномерным распределением в каждой десятилетней возрастной группе.

В лечебных учреждениях здоровые добровольцы в зависимости от производителя МР-томографа, напряженности магнитного поля и апертуры гентри были ранжированы следующим образом:

- 46,9% человек (n = 15) на МРТ 1,5 Тл Creator (General Electric, США) с апертурой гентри 60 см;
- 18,75% человек (n = 6) на МРТ 1,5 Тл Ingenia (Philips, Нидерланды) с апертурой гентри 70 см;
- 18,75% человек (n = 6) на МРТ 1,5 Тл Aera (Siemens, Германия) с апертурой гентри 70 см;
- 15,6% (n = 5) на МРТ 3 Тл Pioneer (General Electric, США) с апертурой гентри 70 см.

На втором этапе с 2023 по 2025 гг. было обследовано 98 пациентов с подозрением на повреждение ПКС или трансплантата ПКС на МРТ 1,5 Тесла Creator (General Electric, США), с апертурой гентри 60 см. Среди всех обследованных пациентов (n=98, 100%) было 58,2% мужчин (n=57) и 41,8% женщин (n=41); средний возраст составил 34,6 года.

Клинический этап обследования предусматривал подробное изучение анамнеза и жалоб пациентов, а также осмотр врача-травматолога-ортопеда, включающий специализированные клинические тесты для определения целостности ПКС и трансплантата. Диагностический этап заключался в проведении МРТ, а также фМРТ коленного сустава по разработанной методике и протоколу исследования с акцентом на ПКС или трансплантат ПКС. В лучевую диагностику пациентов с целью предоперационной подготовки также была включена РГ в 2-х проекциях (не входила в дизайн данного диссертационного исследования).

Благодаря особенностям укладки на фМРТ и позиции катушек сбоку от сустава обеспечивалось свободное естественное движение в коленном суставе с углом сгибания до 50° – 70° , что превышает значения сгибания колена при ходьбе и беге. За 12–16 секунд в зависимости от скорости сгибания колена осуществляли один или несколько двигательных циклов сгибание-разгибание.

В ходе первого этапа исследования было установлено, что наибольшим потенциалом для визуализации ПКС до и после пластики на фМРТ в движении обладает последовательность короткого одноимпульсного ультрабыстрого спинного эха с половинным-Фурье преобразованием (SS-FSE/SS-TSE/HASTE – в зависимости от производителя МР-томографа). Данная ИП обладает достаточным пространственным и главное – временным разрешением для визуализации сгибания и разгибания коленного сустава в реальном времени с оценкой движения ПКС или ее трансплантата. фМРТ по данному протоколу была успешно выполнена у всех здоровых добровольцев и пациентов ($n = 130, 100\%$).

фМРТ в движении в реальном времени дополнялась выполнением серий изображений в псевдодинамическом режиме с фиксированным углом сгибания в суставе. Это было необходимо как для определения возможностей псевдодинамических изображений в выявлении патологии ПКС и трансплантата, так и для получения изображений с жироподавлением. Последовательности с жироподавлением на псевдодинамических сериях (PD FS) были более чувствительны к детекции отека волокон ПКС и сухожилий трансплантата, а также

обладали большим пространственным разрешением за счет времени сбора данных (3–4,5 мин) по сравнению с последовательностями фМРТ в движении в реальном времени.

При анализе данных фМРТ производили оценку анатомической целостности ПКС и трансплантата на разных углах сгибания, изменения натяжения волокон связки и сухожилий в движении, особенности геометрии и изменения пространственного положения волокон ПКС при сгибании и разгибании, биомеханики мышечков бедренной и большеберцовой костей с выявлением нестабильности.

После клинико-диагностического исследования всем пациентам (100%, $n = 98$) выполняли артроскопию коленного сустава (стандартно использовали 3 порта: 1 переднелатеральный и 2 переднемедиальных). Результаты артроскопического осмотра с применением фото- и видеофиксации затем сравнивали с данными МРТ и фМРТ. В ходе артроскопического хирургического вмешательства оценивали состояние ПКС и трансплантата (наличие повреждения и его степень), а также сопутствующие изменения внутренних структур коленного сустава (менисков, суставного хряща, наличие жидкости, крови и свободных тел в суставе, остеофитов, артрофиброза и т. д.).

На основании полученных результатов лучевой диагностики и проведенных операций на коленном суставе для всех пациентов были составлены таблицы соответствия предполагаемой степени повреждения ПКС и трансплантата для МРТ и фМРТ с артроскопической верификацией. Также анализировали достоверность МРТ и фМРТ методик и диагностическое согласие с артроскопией на основе заключений врача-рентгенолога.

Исходя из количества верных и ошибочных диагнозов для каждой степени повреждения ПКС и трансплантата (норма, частичный разрыв, полный разрыв) по результатам МРТ и фМРТ производили вычисление диагностической эффективности и прогностической ценности каждого из методов. Для этого рассчитывали показатели Sn, Sp, Ac, PPV и NPV.

Sn, Sp, Ac и показатели прогностической ценности оказались выше для фМРТ по сравнению со стандартной МРТ для каждой степени разрыва ПКС:

- для нормальной ПКС:
 - МРТ: Sn – 64,0%, Sp – 85,7%, Ac – 76,7%, PPV – 76,2%, NPV – 76,9%;
 - фМРТ: Sn – 92,0%, Sp – 97,14%, Ac – 95,0%, PPV – 95,8%, NPV – 94,4%;
- для частичного разрыва ПКС:
 - МРТ: Sn – 50,0%, Sp – 78,1%, Ac – 73,7%, PPV – 23,8%, NPV – 92,3%;
 - фМРТ: Sn – 83,3%, Sp – 93,8%, Ac – 92,1%, PPV – 60,0%, NPV – 96,0%;
- для полного разрыва ПКС:
 - МРТ: Sn – 59,3%, Sp – 93,9%, Ac – 78,3%, PPV – 88,9%, NPV – 73,8%;
 - фМРТ: Sn – 92,6%, Sp – 97,0%, Ac – 95,0%, PPV – 96,2%, NPV – 94,1%.

фМРТ ($k = 0,838$) также продемонстрировала значимое увеличение диагностического согласия с артроскопией по сравнению с МРТ ($k = 0,430$) и повышение среднего уровня достоверности правильного диагноза (3,86 для МРТ и 4,5 для фМРТ) при подозрении на повреждение ПКС.

Показатели диагностической эффективности и прогностической ценности функциональной МРТ превзошли таковые показатели стандартной МРТ при выявлении каждой степени повреждения трансплантата ПКС и составили:

- для нормального трансплантата ПКС:
 - МРТ: Sn – 64,7%, Sp – 85,7%, Ac – 76,7%, PPV – 73,3%, NPV – 74,0%;
 - фМРТ: Sn – 94,1%, Sp – 95,2%, Ac – 94,7%, PPV – 94,1%, NPV – 95,2%;
- для частичного разрыва трансплантата:
 - МРТ: Sn – 62,5%, Sp – 81,0%, Ac – 73,7%, PPV – 30,0%, NPV – 89,3%;
 - фМРТ: Sn – 75,0%, Sp – 92,3%, Ac – 90,0%, PPV – 71,8%, NPV – 96,8%;
- для полного разрыва трансплантата:
 - МРТ: Sn – 66,7%, Sp – 87,0%, Ac – 79,0%, PPV – 76,9%, NPV – 80,0%;
 - фМРТ: Sn – 93,3%, Sp – 100,0%, Ac – 97,4%, PPV – 100,0%, NPV – 95,8%.

фМРТ ($k = 0,874$) также продемонстрировала значимое увеличение диагностического согласия с артроскопией по сравнению с МРТ ($k = 0,430$) и

повышение среднего уровня достоверности правильного диагноза (3,63 для МРТ и 4,6 для фМРТ) при подозрении на повреждение трансплантата ПКС.

Высокая диагностическая эффективность фМРТ сделала возможным усовершенствовать алгоритм лучевого обследования пациентов с травмой коленного сустава и подозрением на разрыв ПКС или трансплантата. Применение фМРТ в алгоритме клинико-лучевого обследования повышает точность и достоверность определения степени разрыва ПКС до и после пластики, особенно при неоднозначной клинической и МР-картине, что в конечном счете способствует оптимальной тактике лечения пациентов.

В рамках диссертационной работы были сформулированы морфологические и биомеханические критерии нормальной и патологической функции ПКС и ее трансплантата в движении, определена геометрия движения мышечков бедренной и большеберцовой костей при стабильном и нестабильном коленном суставе. Это стало возможным благодаря использованию комплекса инновационных технических, методологических и функциональных решений, реализованных в виде унифицированной методики и протокола проведения фМРТ коленного сустава.

К достоинствам разработанной методики фМРТ следует отнести расширение динамического диапазона визуализации ПКС и трансплантата на разных углах сгибания сустава по сравнению со стандартным МРТ в положении полного разгибания, что оказалось критически важным для диагностики субсиновиальных разрывов ПКС, повреждении одного из двух пучков ПКС, дифференцирования функциональной несостоятельности трансплантата на фоне лигаментизации или компромиссного положения костных каналов.

Внедрение фМРТ в схему обследования пациентов привело к сокращению ошибочных диагнозов частичного разрыва ПКС по сравнению с МРТ за счет увеличения специфичности на 23,1%. Таким образом, у части пациентов по данным фМРТ была верно диагностирована норма или полный разрыв ПКС, вместо частичного разрыва по данным МРТ, что привело к изменению характера и сроков артроскопического вмешательства.

К предрасполагающим факторам, определившим повышение диагностической эффективности и достоверности фМРТ при оценке повреждений ПКС до и после пластики, следует отнести:

- визуализацию структуры ПКС и трансплантата в различные фазы двигательного цикла (объем сгибания в коленном суставе от 50° до 70°);
- анализ вектора движения и геометрии волокон связки и трансплантата при разных углах сгибания сустава;
- анализ фаз изометрического сокращения/расслабления ПМ и ЗЛ пучков связки или натяжения пучков сухожилий трансплантата;
- детекцию переднезадней нестабильности в коленном суставе.

Изображения ПКС коленного сустава на фМРТ, полученные в кино-режиме, не требуют дополнительной постобработки и могут быть доступны для анализа с помощью любой современной программы для просмотра DICOM-файлов. Данная возможность крайне актуальна для травматологов-ортопедов, так как позволяет им точнее планировать оперативное вмешательство с помощью фМРТ (выбор зон футпринтов, костных каналов, необходимость нотч-пластики).

В процессе диссертационного исследования была подтверждена гипотеза универсальности разработанной методики фМРТ: фМРТ может быть проведена как отдельно, так и в комбинации со стандартной МРТ коленного сустава в рамках одного исследования в положении пациента лежа на животе. Данный вариант проведения исследования не требует дополнительного времени на переукладку самого пациента, катушек для исследования или дополнительную настройку томографа, не сопровождается потерей в качестве исследования. Получаемые на МРТ изображения коленного сустава при исследовании пациента в положении лежа на животе имеют аналогичное соотношение-сигнал шум, не демонстрируют дополнительных артефактов или иных диагностических отличий по сравнению с классическим вариантом укладки пациента лежа на спине.

К ограничениям разработанной методики фМРТ следует отнести:

- потерю диагностической ценности фМРТ при невозможности выполнить движение в коленном суставе;

- необходимость предварительной индивидуальной настройки протокола фМРТ на каждом томографе с учетом доступного программного обеспечения;
- необходимость наличия многоканальных гибких катушек для суставов для проведения фМРТ.

фМРТ коленного сустава по рекомендованной в данном исследовании методике может быть успешно использована не только для выявления разрыва ПКС после травмы, но и оценки эффективности хирургической реконструкции ПКС или успешности проведенной реабилитации и консервативного лечения. Во многом это связано с дополнением информации по лучевой анатомии и МР-семиотике повреждения ПКС и трансплантата в движении в рамках диссертационного исследования, выделению новых, дополнительных признаков нормы и патологии ПКС и трансплантата при динамической флексии-экстензии сустава.

В ходе проведения научно-исследовательской работы с включением фМРТ в алгоритм клинично-лучевого обследования был скорректирован и изменен объем и вид планируемой артроскопической операции у 28,6% пациентов ($n = 28$).

С учетом всех вышеизложенных аспектов, у пациентов с подозрением на повреждение ПКС коленного сустава до и после пластики с целью повышения точности и достоверности возможностей лучевой диагностики должна быть рекомендована разработанная методика фМРТ

Широкое применение фМРТ коленного сустава в практической работе медицинского учреждения способно решить несколько задач лечебного и профилактического уровня. Во-первых, уменьшение частоты ошибочных диагнозов разрыва ПКС и ее трансплантата на фМРТ позволит избежать излишних артроскопических вмешательств. Во-вторых, своевременная диагностика скрытой нестабильности в коленном суставе и функциональной несостоятельности ПКС и трансплантата позволит своевременно выполнить ревизионную артроскопию и реконструкцию. В-третьих, раннее выявление нарушений пассивной стабилизации коленного сустава позволит сократить число случаев посттравматического артроза и повреждения других внутренних структур, таких как связки, мениски, суставной

хрящ. Все вышеизложенное позволит повысить качество жизни пациентов, снизить риски потери трудоспособности и нагрузку на медицинскую систему в целом.

ВЫВОДЫ

1. Разработанные методика и протокол функциональной магнитно-резонансной томографии коленного сустава могут быть выполнены на магнитно-резонансных томографах различных производителей с напряженностью магнитного поля 1,5–3 Тл, с апертурой гентри 60–70 см, не требует дополнительного оборудования или программного обеспечения, и занимают не более 5–10 минут.
2. Разработанные и используемые в данном исследовании признаки нормальной анатомии и биомеханики передней крестообразной связки на функциональной магнитно-резонансной томографии, а также новые, дополнительные признаки разрыва передней крестообразной связки значительно увеличивают диагностическое согласие с артроскопией для функциональной магнитно-резонансной томографии ($k = 0,838$) по сравнению с магнитно-резонансной томографией ($k = 0,430$) и повышают средний уровень достоверности правильного диагноза (на 0,64).
3. Разработанные и используемые в данном исследовании признаки нормальной анатомии и биомеханики трансплантата передней крестообразной связки на функциональной магнитно-резонансной томографии, а также новые, дополнительные признаки разрыва трансплантата передней крестообразной связки значительно увеличивают диагностическое согласие с артроскопией для функциональной магнитно-резонансной томографии ($k = 0,874$) по сравнению с магнитно-резонансной томографией ($k = 0,430$) и повышают средний уровень достоверности правильного диагноза (на 0,97).
4. Функциональная магнитно-резонансная томография превосходит стандартную магнитно-резонансную томографию в диагностической эффективности и прогностической ценности при подозрении на повреждение передней крестообразной связки коленного сустава (AUC для функциональной магнитно-резонансной томографии на 0,2 выше для нормы, на 0,18 – для частичного и полного разрывов передней крестообразной связки), что позволяет

использовать функциональную магнитно-резонансную томографию в качестве метода-классификатора степени разрыва передней крестообразной связки.

5. Функциональная магнитно-резонансная томография превосходит стандартную магнитно-резонансную томографию в диагностической эффективности и прогностической ценности при подозрении на повреждение трансплантата передней крестообразной связки коленного сустава (AUC для функциональной магнитно-резонансной томографии на 0,22 выше для нормы, на 0,25 для частичного разрыва и на 0,20 для полного разрыва), что позволяет использовать функциональную магнитно-резонансную томографию в качестве метода-классификатора степени разрыва трансплантата передней крестообразной связки.

6. Включение функциональной магнитно-резонансной томографии в разработанный алгоритм лучевого обследования при подозрении на повреждение передней крестообразной связки до и после пластики позволит повысить диагностическую эффективность и сократить количество ошибочных диагнозов «частичный разрыв» по данным стандартной магнитно-резонансной томографии.

ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ

1. Функциональную магнитно-резонансную томографию коленного сустава по разработанной методике и протоколу можно использовать на любом высокопольном магнитно-резонансном томографе при наличии многоканальных гибких катушек для суставов.
2. При проведении аналогичных функциональных исследований коленного сустава для диагностики состояния передней крестообразной связки до и после пластики могут быть использованы разработанные на функциональной магнитно-резонансной томографии дополнительные прямые и косвенные признаки разрыва передней крестообразной связки и ее трансплантата в движении.
3. Функциональная магнитно-резонансная томография коленного сустава должна быть рекомендована всем пациентам с подозрением на повреждение передней крестообразной связки или ее трансплантата при предполагаемом диагнозе «частичный разрыв» по данным стандартной магнитно-резонансной томографии.
4. Функциональная магнитно-резонансная томография коленного сустава должна быть рекомендована всем пациентам со слабоположительными или сомнительными результатами клинических тестов на повреждение передней крестообразной связки или ее трансплантата, а также при несовпадении результатов клинических тестов и стандартной магнитно-резонансной томографии.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

ВИ – взвешенное изображение

ДЭКТ – двухэнергетическая компьютерная томография

ЗКС – задняя крестообразная связка

ЗЛ – заднелатеральный

ИП – импульсная последовательность

КТ – компьютерная томография

МР – магнитно-резонансный

МРТ – магнитно-резонансная томография

ОА – остеоартроз

ПВЯ – передний выдвижной ящик

ПКС – передняя крестообразная связка

ПМ – переднемедиальный

ПЭТ – позитронно-эмиссионная томография

РГ – рентгенография

РФП – радиофармпрепарат

стресс-РГ – стресс-рентгенография

УЗИ – ультразвуковое исследование

фМРТ – функциональная магнитно-резонансная томография

3D – 3-dimensional

Ac – точность

ASSET – Array Coil Spatial Sensitivity Encoding, метод параллельного получения изображений с использованием чувствительности катушек

AUC – Area Under the Curve, площадь под кривой

bFFE – Balanced Fast Field Echo, сбалансированное быстрое полевое эхо

FIESTA – Fast Imaging Employing Steady-state Acquisition, быстрое получение изображений с использованием стационарного состояния

FN – количество ложноотрицательных результатов

FP – количество ложноположительных результатов

FS, Fat Sat – Fat Saturation, жироподавление

FSE – Fast Spin Echo, быстрое спин-эхо

FSPGR – Fast Spoiled Gradient Recalled, быстрое градиентное эхо с разрушением

GRE – Gradient Echo, градиентное-эхо

HASTE – Half-Fourier Acquisition Single-shot Turbo spin-Echo, быстрое спиновое эхо с половинным преобразованием Фурье за один цикл

IKDC – International Knee Documentation Committee

iPAT – integrated Parallel Acquisition Techniques, интегрированная технология параллельной визуализации

mSENSE – modified Sensitivity Encoding, метод формирования изображения совмещением канальных изображений

NPV – прогностичность отрицательного результата

PD – Proton Density, протонная плотность

PPV – прогностичность положительного результата

QALY – The Quality-Adjusted Life Year

SE – Spin Echo, спин-эхо

SENSE – SENSitivity Encoding, кодирование с учетом чувствительности

Sn – чувствительность

Sp – специфичность

SS – Single-shot, одноимпульсный

SS-FSE – Single Shot Fast Spin Echo, однократное быстрое спиновое эхо

SSFP – Steady-State Free Precession, стационарная свободная прецессия

SSH-TSE – Single Shot High-speed Turbo Spin Echo, однократное высокоскоростное турбо спин-эхо

TE – Time of Echo, время эха

TFE – Turbo Field Echo, турбо-градиентное эхо

TN – количество истинно отрицательных результатов

TP – количество истинно положительных результатов

TR – Time of Repetition, время повторения

TrueFISP – True Fast Imaging with Steady-state Precession, истинная быстрая визуализация со стационарной прецессией

TSE – Turbo Spin Echo, турбо спин-эхо

TurboFLASH – Turbo Fast Low-Angle Shot, сверхбыстрая томография с малыми углами

Ultrafast GRE – Ultrafast Gradient Echo, сверхбыстрое градиентное эхо

Ultrafast SE – Ultrafast Spin Echo, ультрабыстрое спин-эхо

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анализ эффективности технологий артроскопической пластики передней крестообразной связки коленного сустава / В.В. Заяц, А.К. Дулаев, А.В. Дыдыкин [и др.] // Вестник хирургии им. И.И. Грекова. – 2017. – Т. 176. – № 2. – С. 77–82.
2. 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.
3. Артроскопическая реконструкция передней крестообразной связки аутотрансплантатом из связки надколенника: методические рекомендации / А.В. Королев, Н.В. Загородний, Н.Н. Гнелица [и др.]. – Москва: Наука, 2004. – 63 с. – Текст: непосредственный.
4. Артроскопическая реконструкция передней крестообразной связки коленного сустава / Г.Д. Лазишвили, В.В. Кузьменко, В.Э. Гиршин [и др.] // Вестник травматологии и ортопедии им. Приорова Н.Н. – 1997. – № 1. – С. 23–27.
5. Ахтямов, И.Ф. Современные методы восстановительного лечения пациентов после артроскопической реконструктивной пластики передней крестообразной связки коленного сустава: обзор литературы / И.Ф. Ахтямов, В.И. Айдаров, Э.Р. Хасанов // Гений ортопедии. – 2021. – Т. 27. – № 1. – С. 121–127.
6. Бальжинимаев, Д.Б. Однопучковая и двухпучковая артроскопические реконструкции передней крестообразной связки (обзор литературы) / Д.Б. Бальжинимаев, И.Н. Михайлов, В.В. Монастырев // Acta Biomedica Scientifica. – 2019. – Т. 4. – № 6. – С. 95–100.
7. Банцер, С.А. Сравнительная характеристика чрезбольшеберцовой и переднемедиальной техник формирования костных туннелей при артроскопической реконструкции передней крестообразной связки: дис. ... канд. мед. наук: 14.01.15 – Травматология и ортопедия / Банцер Сергей Александрович; ФГБУ «РНИИТО им. Р.Р. Вредена». – Санкт-Петербург, 2018. – 185 с.

8. Бахвалова, В.А. Функциональная мультиспиральная компьютерная томография коленного сустава в диагностике патологии пателлофemorального сочленения: дис. ... канд. мед. наук: 14.01.13 – Лучевая диагностика, лучевая терапия / Бахвалова Вера Александровна; ФГАОУ ВО Первый МГМУ имени И.М. Сеченова Минздрава России (Сеченовский Университет). – Москва, 2022. – 138 с.
9. Взаимосвязь положения костных каналов при артроскопической пластике передней крестообразной связки, интраоперационных пожеланий хирурга и антропометрических данных пациента / А.В. Королев, Н.Е. Магнитская, М.С. Рязанцев [и др.] // Травматология и ортопедия России. – 2016. – Т. 22. – № 1. – С. 85–95.
10. Возможности функциональной мультиспиральной компьютерной томографии коленного сустава в диагностике латеропозиции надколенника и гиперпрессии латеральной фасетки надколенника / Н.С. Серова, В.А. Бахвалова, А.В. Лычагин, М.М. Липина // Российский электронный журнал лучевой диагностики. – 2022. – Т. 12. – № 2. – С. 189–199.
11. Возможности функциональной мультиспиральной компьютерной томографии коленного сустава в диагностике патологии пателлофemorального сочленения / С.К. Терновой, Н.С. Серова, В.А. Бахвалова [и др.] // Российский электронный журнал лучевой диагностики. – 2020. – Т. 10. – № 2. – С. 129–139.
12. Гиршин, С.Г. Коленный сустав (повреждения и болевые синдромы) / С.Г. Гиршин, Г.Д. Лазишвили. – Москва: НЦССХ им. А.Н.Бакулева РАМН, 2007. – 352 с. – ISBN: 978-5-7982-0182-2. – Текст: непосредственный.
13. Диагностические возможности и перспективы МРТ коленного сустава: результаты многоцентрового исследования / С.П. Морозов, С.К. Терновой, И.Ю. Насникова [и др.] // Медицинская визуализация. – 2010. – № 1. – С. 58–65.
14. Жирнова, Т.Т. Диагностика разрывов передней крестообразной связки у военнослужащих различными методами лучевой диагностики / Т.Т. Жирнова, С.В. Городничий, Э.Ю. Дмитриева // Главный врач Юга России. – 2017. – № 4 (57). – С. 14–16.

15. Исследование возможностей МРТ в диагностике повреждений коленного сустава / С.П. Морозов, С.К. Терновой, И.Ю. Насникова [и др.] // Вестник рентгенологии и радиологии. – 2008. – № 4–6. – С. 25–32.
16. Исходы восстановления передней крестообразной связки / М.Э. Ирисметов, Ф.М. Усмонов, Д.Ф. Шамшиметов [и др.] // Гений ортопедии. – 2019. – Т. 25. – № 3. – С. 285–289.
17. Клинические рекомендации. Повреждение связок коленного сустава / Общероссийская общественная организация «Ассоциация травматологов-ортопедов России» (АТОР), Всероссийская общественная организация «Союз реабилитологов России». – 2024. – URL: https://cr.minzdrav.gov.ru/preview-cr/691_2 – Текст: электронный. (Дата обращения: 20.03.2026)
18. Кожевников, Е.В. Пластическое восстановление передней крестообразной связки свободным ауто трансплантатом из сухожилия длинной малоберцовой мышцы / Е.В. Кожевников, П.А. Баженов // Политравма. – 2011. – № 1. – С. 76–81.
19. Королев, А.В. Комплексное восстановительное лечение пациентов с повреждениями менисков и связок коленного сустава с использованием артроскопических методик: дис. ... док. мед. наук: 14.00.22 – Травматология и ортопедия; 14.00.51 – Восстановительная медицина, спортивная медицина, курортология и физиотерапия / Королев Андрей Вадимович; Российский университет дружбы народов. – Москва, 2004. – 364 с.
20. Королев, А.В. Физическая реабилитация пациентов после артроскопических операций на коленном суставе / А.В. Королев // Скорая медицинская помощь. – 2003. – Спец. выпуск. – С. 48.
21. Лагунова, И.Г. Рентгеноанатомия скелета / И.Г. Лагунова. – Москва: Медицина, 1981. – 368 с. – Текст: непосредственный.
22. Лазишвили, Г.Д. Оперативное лечение повреждений связочно-капсульного аппарата коленного сустава: дис. ... док. мед. наук: 14.00.22 – Травматология и ортопедия / Лазишвили Гурам Давидович. – Москва, 2005. – 334 с.
23. Лафта, А.Ю. Достоверность результатов ультразвукового исследования и магнитно-резонансной томографии у пациентов с повреждением передней

- крестообразной связки / А.Ю. Лафта, Х.А. Джасим, М.А. Хасан. – Российский электронный журнал лучевой диагностики. – 2024. – Т. 14. – № 3. – С. 91–102.
24. Лоскутов, А.Е. Артроскопическое восстановление передней крестообразной связки / А.Е. Лоскутов, М.Е. Головаха // Ортопедия, травматология и протезирование. – 2005. – № 1. – С. 50–54.
25. Миронов, С.П. Оперативное лечение повреждений крестообразных связок коленного сустава / С.П. Миронов, З.С. Миронова, А.К. Орлецкий // Вестник травматологии и ортопедии им. Н.Н. Приорова. – 2001. – Т. 8. – № 2. – С. 51–55.
26. Миронов, С.П. Повреждение связок коленного сустава / С.П. Миронов, А.К. Орлецкий, М.Б. Цыкунов. – 2-е изд., испр. и доп. – Москва: Лесар, 1999. – 206 с. – ISBN: 5-93580-001-2. – Текст: непосредственный.
27. Миронов, С.П. Современные методы фиксации аутотрансплантатов при реконструкции передней крестообразной связки / С.П. Миронов, А.К. Орлецкий, Д.О. Тимченко // Вестник травматологии и ортопедии им. Н.Н. Приорова. – 2006. – № 3. – С. 44–47.
28. Морозов, С.П. Магнитно-резонансная томография в диагностике повреждений коленного и плечевого суставов: дис. ... док. мед. наук: 14.01.13 – Лучевая диагностика, лучевая терапия / Морозов Сергей Павлович; ГОУ ВПО ММА имени И.М. Сеченова Минздравсоцразвития России. – Москва, 2010. – 205 с.
29. МРТ. Суставы нижней конечности: руководство для врачей / под ред. профессора Г.Е. Труфанова, профессора В.А. Фокина. – Москва: ГЭОТАР-Медиа, 2018. – 605 с. – ISBN: 978-5-9704-4514-3. – Текст: непосредственный.
30. Патент на изобретение № 2839527, Российская Федерация, С1, МПК А61В 5/055. Способ проведения функциональной магнитно-резонансной томографии коленного сустава и крестообразных связок в движении / С.К. Терновой, П.А. Филистеев, А.И. Семенов, А.Ю. Заров. Патентообладатель: ФГАОУ ВО Первый МГМУ имени И.М. Сеченова Минздрава России (Сеченовский Университет). – 2024116255, заявл. 13.06.2024; опубл. 05.05.2025, Бюл. № 13.
31. Пластика передней крестообразной связки коленного сустава ауто сухожилием полусухожильной мышцы / А.В. Королев, Г.В. Федорук, Г.М. Крутов, В.Г. Голубев

// Сборник материалов III конгресса Российского Артроскопического Общества. – Москва, 2000. – С. 65–70.

32. Повреждения передней крестообразной связки коленного сустава: диагностика, лечение, реабилитация / Под ред. Г.Д. Лазишвили, А.В. Королева. – Москва, ИПК «Дом книги», 2013. – 370 с. – Текст: непосредственный.

33. Причины ревизионных вмешательств после пластики передней крестообразной связки: систематический обзор / А.С. Сапрыкин, М.А. Гвоздев, М.В. Рябинин, Н.Н. Корнилов // Сибирский научный медицинский журнал. – 2021. – Т. 41. – № 3. – С. 4–11.

34. Радыш, И.И. Оценка эффективности комплексной медицинской реабилитации пациентов после ранней и отсроченной реконструкции передней крестообразной связки: дис. ... канд. мед. наук: 3.1.33. Восстановительная медицина, спортивная медицина, лечебная физкультура, курортология и физиотерапия, медико-социальная реабилитация; 3.1.8. Травматология и ортопедия / Радыш Иван Иванович; ФГБУ ДПО «Центральная государственная медицинская академия» Управления делами Президента Российской Федерации. – Москва, 2024. – 150 с.

35. Рейнберг, С.А. Рентгенодиагностика заболеваний костей и суставов / С.А. Рейнберг. – 4-е изд., испр. и доп. – Москва: Медицина, 1964. – 2 т. – Текст: непосредственный.

36. Степанченко, А.П. Лучевая диагностика травматических повреждений коленного сустава: дис. ... канд. мед. наук: 14.00. 19 – Лучевая диагностика, лучевая терапия / Степанченко Андрей Петрович; ГОУ ИПК ФУ «Медбиоэкстрем» при МЗиСР РФ. – Москва, 2005. – 194 с.

37. Травматология и ортопедия: руководство для врачей в 4 т. / [Г.Е. Афиногенов и др.]; под общ. ред. Н.В. Корнилова. – Санкт-Петербург: Гиппократ, 2004–. – ISBN: 5-8232-0240-7. – Текст: непосредственный.

38. Травматология: национальное руководство / под ред. Г.П. Котельникова, С.П. Миронова. – 3-е изд., перераб. и доп. – Москва: ГЭОТАР-Медиа, 2018. – 773 с. – ISBN: 978-5-9704-4550-1. – Текст: непосредственный.

39. Федоров, Р.А. Совершенствование хирургической тактики лечения военнослужащих с последствиями разрыва передней крестообразной связки: дис. ... канд. мед. наук: 14.01.15 – Травматология и ортопедия / Федоров Роман Александрович; ФГБУ «РНИИТО им. Р.Р. Вредена». – Санкт-Петербург, 2016. – 194 с.
40. Филистеев, П.А. Возможности КТ-артрографии при травме коленного сустава / П.А. Филистеев, И.Ю. Насникова, С.П. Морозов // Кремлевская медицина. Клинический вестник. – 2010. – № 2. – С. 72–78.
41. Функциональная магнитно-резонансная томография в диагностике повреждений трансплантата передней крестообразной связки коленного сустава / П.А. Филистеев, А.И. Семенов, А.Ю. Заров, С.А. Кондрашин, Н.С. Серова, С.К. Терновой // Российский электронный журнал лучевой диагностики. – 2025. – Т. 15. – № 3. – С. 221–231.
42. Функциональная магнитно-резонансная томография в диагностике разрывов передней крестообразной связки коленного сустава / Н.С. Серова, С.К. Терновой, П.А. Филистеев, А.И. Семенов, Н.В. Загородний // Медицинский вестник МВД. – 2025. – Т. 138. – № 5. – С. 58–65.
43. Функциональная магнитно-резонансная томография в оценке биомеханики передней крестообразной связки коленного сустава: методика и протокол исследования / П.А. Филистеев, С.К. Терновой, Н.С. Серова, А.И. Семенов, А.Ю. Заров // Российский электронный журнал лучевой диагностики. – 2024. – Т. 14. – № 4. – С. 167–178.
44. Штробель, М. Руководство по артроскопической хирургии: в 2 т. / Михаэль Штробель; пер. с англ. Д.О. Ильина [и др.]; под ред. А.В. Королева. – Москва: Панфилов, 2011–2012. – Т. 1. – 2012. – 658 с. – ISBN: 978-5-91839-009-8. – Текст: непосредственный.
45. Эпидемиология повреждений передней крестообразной связки у футболистов Российской Премьер-Лиги в 2010–2022 гг. / Э.Н. Безулогв, И.Д. Степанов, С.А. Измайлов, А.Ю. Еманов. – URL:

- <https://static.rfs.ru/content/post/document/2022/03/6243209d1fa92.pdf> – Текст: электронный. (Дата обращения: 20.03.2026)
46. 20 years of pediatric anterior cruciate ligament reconstruction in New York State / E.R. Dodwell, L.E. LaMont, D.W. Green [et al.] // *Am J Sports Med.* – 2014. – Vol. 42. – № 3. – P. 675–680.
47. A case-control study of anterior cruciate ligament volume, tibial plateau slopes and intercondylar notch dimensions in ACL-injured knees / R.A. Simon, J.S. Everhart, H.N. Nagaraja, A.M. Chaudhari // *J Biomech.* – 2010. – Vol. 43. – № 9. – P. 1702–1707.
48. A clinical and radiographical analysis of 127 anterior cruciate insufficient knees / M. Sherman, R.F. Warren, J.L. Marshall, G.J. Savatsky // *Clin Orthop Relat Res.* – 1988. – Vol. 227. – P. 229–237.
49. A comparison of preoperative evaluation of anterior knee laxity by dynamic X-rays and by the arthrometer KT 1000 / J.L. Lerat, B. Moyon, J.Y. Jenny, J.P. Perrier // *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* – 1993. – Vol. 1. – № 1. – P. 54–59.
50. A dynamic study of the anterior cruciate ligament of the knee using an open MRI / D. Guenoun, J. Vaccaro, T. Le Corroller [et al.] // *Surg Radiol Anat.* – 2017. – Vol. 39. – № 3. – P. 307–314.
51. A new knee arthrometer, the GNRB: experience in ACL complete and partial tears / H. Robert, S. Nouveau, S. Gageot, B. Gagnière // *Orthop Traumatol Surg Res.* – 2009. – Vol. 95. – № 3. – P. 171–176.
52. A novel multipurpose device for guided knee motion and loading during dynamic magnetic resonance imaging / N.M. Brisson, M. Krämer, L.A.N. Krahl [et al.] // *Z Med Phys.* – 2022. – Vol. 32. – № 4. – P. 500–513.
53. A Systematic Summary of Systematic Reviews on the Topic of the Anterior Cruciate Ligament / M.J. Anderson, W.M. Browning 3rd, C.E. Urband [et al.] // *Orthop J Sports Med.* – 2016. – Vol. 4. – № 3. – P. 2325967116634074.
54. A threshold value of 3.5 mm of passive anterior tibial subluxation on MRI is highly specific for complete ACL tears / A. Hardy, S. Klouche, P. Szarzynski [et al.] // *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* – 2019. – Vol. 27. – № 3. – P. 885–892.

55. Abnormal bone scans of the tibial tunnel 2 years after patella ligament anterior cruciate ligament reconstruction: correlation with tunnel enlargement and tibial graft length / T. Hogervorst, C.P. van der Hart, T.H. Pels Rijcken, W.K. Taconis // *Knee Surgery Sports Traumatology Arthroscopy*. – 2000. – Vol. 8. – № 6. – P. 322–328.
56. Accuracy of 64-section MDCT in the diagnosis of cruciate ligament tears / E.J. Heffernan, D.E. Moran, J.F. Gerstenmaier [et al.] // *Clin Radiol*. – 2017. – Vol. 72. – № 7. – P. 611.e1–611.e8.
57. Accuracy of magnetic resonance imaging in predicting anterior cruciate ligament tear location and tear degree / H.T. Shu, N.R. Wegener, K.M. Connors [et al.] // *J Orthopaed*. – 2021. – Vol. 25. – P. 129–133.
58. ACL graft metabolic activity assessed by ¹⁸FDG PET–MRI / R.A. Magnussen, K. Binzel, J. Zhang [et al.] // *Knee*. – 2017. – Vol. 24. – № 4. – P. 792–797.
59. ACL Injury and its Treatment / M. Ochi, K. Shino, K. Yasuda, M. Kurosaka (eds.). – Springer, 2016. – 576 p. – ISBN: 978-4431558569. – Текст: непосредственный.
60. ACL Reconstruction with Augmentation: a Scoping Review / M.D. Riediger, D. Stride, S.E. Coke [et al.] // *Curr Rev Musculoskelet Med*. – 2019. – Vol. 12. – № 2. – P. 166–172.
61. ACL stump and ACL femoral landmarks are equally reliable in ACL reconstruction for assisting ACL femoral tunnel positioning / W. Liu, Y. Wu, X. Wang [et al.] // *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*. – 2023. – Vol. 31. – № 1. – P. 219–228.
62. Al Mohammad, B. Magnetic Resonance Imaging of Anterior Cruciate Ligament Injury / B. Al Mohammad, M.A. Gharaibeh // *Orthop Res Rev*. – 2024. – Vol. 16. – P. 233–242.
63. Alardi, I.M. Knee lesions with anterior cruciate ligament (ACL) tear in Iraqi adult males: arthroscopic findings / I.M. Alardi // *J Med Life*. – 2023. – Vol. 16. – № 9. – P. 1335–1337.
64. Alpine Skiing Injuries / A. Davey, N.K. Endres, R.J. Johnson, J.E. Shealy // *Sports Health*. – 2019. – Vol. 11. – № 1. – P. 18–26.

65. Anatomic double-bundle anterior cruciate ligament reconstruction / A.M. Buoncristiani, F.P. Tjoumakaris, J.S. Starman [et al.] // *Arthroscopy*. – 2006. – Vol. 22. – № 9. – P. 1000–1006.
66. Anterior cruciate ligament injury and radiologic progression of knee osteoarthritis: a systematic review and meta-analysis / A. Ajuied, F. Wong, C. Smith [et al.] // *Am J Sports Med*. – 2014. – Vol. 42. – № 9. – P. 2242–2252.
67. Anterior cruciate ligament reconstruction autograft choice: bone-tendon-bone versus hamstring: does it really matter? A systematic review / K.P. Spindler, J.E. Kuhn, K.B. Freedman [et al.] // *Am J Sports Med*. – 2004. – Vol. 32. – № 8. – P. 1986–1995.
68. Anterior cruciate ligament reconstruction: MR imaging signs of anterior knee laxity in the presence of an intact graft / A.M. Naraghi, S. Gupta, L.M. Jacks [et al.] // *Radiology*. – 2012. – Vol. 263. – № 3. – P. 802–810.
69. Anterior Cruciate Ligament Ruptures in Russian Premier League Soccer Players During the 2010 to 2021/2022 Competitive Seasons: The Epidemiology and Details of Return to Sports / E. Bezuglov, G. Malyakin, A. Emanov [et al.] // *Orthop J Sports Med*. – 2024. – Vol. 12. – № 8. – P. 23259671241261957.
70. Anterior cruciate ligament tear: indirect signs at MR imaging / A. Gentili, L.L. Seeger, L. Yao, H.M. Do // *Radiology*. – 1994. – Vol. 193. – № 3. – P. 835–840.
71. Anterior cruciate ligament tears and associated meniscal lesions: assessment at dual-detector spiral CT arthrography / B.C. Vande Berg, F.E. Lecouvet, P. Poilvache [et al.] // *Radiology*. – 2002. – Vol. 223. – № 2. – P. 403–409.
72. Anterior cruciate ligament tears in children and adolescents: a meta-analysis of nonoperative versus operative treatment / D.E. Ramski, W.W. Kanj, C.C. Franklin [et al.] // *Am J Sports Med*. – 2014. – Vol. 42. – № 11. – P. 2769–2776.
73. Anterior knee laxity measurement: comparison of passive stress radiographs Telos(®) and "Lerat", and GNRB(®) arthrometer / J. Beldame, S. Mouchel, S. Bertiaux [et al.] // *Orthop Traumatol Surg Res*. – 2012. – Vol. 98. – № 7. – P. 744–750.
74. Arthroscopic Anterior Cruciate Ligament Repair Versus Autograft Anterior Cruciate Ligament Reconstruction: A Meta-Analysis of Comparative Studies / L. Pang, P. Li, T. Li [et al.] // *Front Surg*. – 2022. – Vol. 9. – P. 887522.

75. Arthroscopic anterior cruciate ligament repair with and without suture augmentation: technical note / J.P. Batista, J. Chahla, M. Dalmau-Pastor [et al.] // J ISAKOS. – 2021. – Vol. 6. – № 4. – P. 251–256.
76. Avulsion fracture of the head of the fibula (the "arcuate" sign): MR imaging findings predictive of injuries to the posterolateral ligaments and posterior cruciate ligament / G.S. Huang, J.S. Yu, M. Munshi [et al.] // AJR Am J Roentgenol. – 2003. – Vol. 180. – № 2. – P. 381–387.
77. Bach, B.R. Jr. "Empty wall" and "vertical strut" signs of ACL insufficiency / B.R. Bach Jr, R.F. Warren // Arthroscopy. – 1989. – Vol. 5. – № 2. – P. 137–140.
78. Bachman, A.L. Roentgen Diagnosis of Knee-Joint Effusion / A.L. Bachman // Radiology. – 1946. – Vol. 46. – P. 462–469.
79. Bartolozzi, A.R. The Push-Through Sign-Making the Decision for Selective-Bundle Anterior Cruciate Ligament Surgery / A.R. Bartolozzi, A.V. Jog, T.J. Smith // Arthrosc Tech. – 2019. – Vol. 9. – № 1. – P. e143–e146.
80. Barzin, M. Diagnostic accuracy of ultrasonography in comparison with magnetic resonance imaging in patients with knee trauma / M. Barzin, R. Abdi, H. Golmohammadi // J Gorgan Uni Med Sci. – 2012. – Vol. 14. – № 3. – P. 92–97.
81. "Biological failure" of the anterior cruciate ligament graft / J. Ménétrey, V.B. Duthon, T. Laumonier, D. Fritschy // Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc. – 2008. – Vol. 16. – № 3. – P. 224–231.
82. Biomechanical measures of neuromuscular control and valgus loading of the knee predict anterior cruciate ligament injury risk in female athletes: a prospective study / T.E. Hewett, G.D. Myer, K.R. Ford [et al.] // Am J Sports Med. – 2005. – Vol. 33. – № 4. – P. 492–501.
83. Biomechanics of the anterior cruciate ligament and implications for surgical reconstruction / J. Dargel, M. Gotter, K. Mader [et al.] // Strategies Trauma Limb Reconstr. – 2007. – Vol. 2. – № 1. – P. 1–12.
84. Bollen, S.R. Rupture of the anterior cruciate ligament—a quiet epidemic? / S.R. Bollen, B.W. Scott // Injury. – 1996. – Vol. 27. – № 6. – P. 407–409.

85. Bone tunnel enlargement after ACL reconstruction using autologous hamstring tendons: a CT study / R. Iorio, A. Vadalà, G. Argento [et al.] // *Int Orthop.* – 2007. – Vol. 31. – № 1. – P. 49–55.
86. Breitenseher, M.J. Oblique MR imaging of the anterior cruciate ligament based on three-dimensional orientation / M.J. Breitenseher, M.E. Mayerhoefer // *J Magn Reson Imaging.* – 2007. – Vol. 26. – № 3. – P. 794–798.
87. Can the outside-in half-tunnel technique reduce femoral tunnel widening in anterior cruciate ligament reconstruction? A CT study / R.M. Lanzetti, D. Lupariello, A. De Carli [et al.] // *Eur J Orthop Surg Traumatol.* – 2017. – Vol. 27. – № 5. – P. 659–664.
88. Chatra, P. The CT knee arthrogram revisited / P. Chatra // *BJR Open.* – 2023. – Vol. 6. – № 1. – P. tzad007.
89. Chau, M.M. Complications and Pitfalls of ACL Reconstruction and Graft Failure in Young Athletes / M.M. Chau, N.K. Pandya // *Operative Techniques in Sports Medicine.* – 2025. – Vol. 33. – № 1. – P. 151158.
90. Chiu, S.S. The anterior tibial translocation sign / S.S. Chiu // *Radiology.* – 2006. – Vol. 239. – № 3. – P. 914–915.
91. Clatworthy, M.A. Lind Femoral tunnel placement in ACL reconstruction: central footprint versus AM bundle / M.A. Clatworthy, A. Pearle, M. Williams // *ISAKOS Newsl.* – 2015. – Vol. 2. – P. 22–31.
92. Clinical diagnosis of partial or complete anterior cruciate ligament tears using patients' history elements and physical examination tests / S. Décary, M. Fallaha, S. Belzile [et al.] // *PLoS One.* – 2018. – Vol. 13. – № 6. – P. e0198797.
93. Clinical examination of anterior cruciate ligament rupture: a systematic review and meta-analysis / W. Huang, Y. Zhang, Z. Yao, L. Ma // *Acta Orthop Traumatol Turc.* – 2016. – Vol. 50. – № 1. – P. 22–31.
94. Controversies in soft-tissue anterior cruciate ligament reconstruction: grafts, bundles, tunnels, fixation, and harvest / C.C. Prodromos, F.H. Fu, S.M. Howell [et al.] // *J Am Acad Orthop Surg.* – 2008. – Vol. 16. – № 7. – P. 376–384.

95. Correlation between magnetic resonance imaging and arthroscopic findings in the knee joint / H.A. Khan, H. Ahad, P. Sharma [et al.] // *Trauma Mon.* – 2015. – Vol. 20. – № 1. – P. e.18635
96. Correlation of anthropometric measurements, strength, anterior cruciate ligament size, and intercondylar notch characteristics to sex differences in anterior cruciate ligament tear rates / A.F. Anderson, D.C. Dome, S. Gautam [et al.] // *Am J Sports Med.* – 2001. – Vol. 29. – № 1. – P. 58–66.
97. Correlation of valgus stress radiographs with medial knee ligament injuries: an in vitro biomechanical study / R.F. LaPrade, A.S. Bernhardson, C.J. Griffith [et al.] // *Am J Sports Med.* – 2010. – Vol. 38. – № 2. – P. 330–338.
98. Coulier, B. Direct 3D imaging of the knee menisci during 16-row multislice CT arthrography / B. Coulier // *JBR–BTR.* – 2006. – Vol. 89. – № 6. – P. 291–297.
99. Crawford, S.N. Long-Term Failure of Anterior Cruciate Ligament Reconstruction / S.N. Crawford, B.R. Waterman, J.H. Lubowitz // *Arthroscopy.* – 2013. – Vol. 29. – № 9. – P. 1566–1571.
100. CT Arthrography and Virtual Arthroscopy in the Diagnosis of the Anterior Cruciate Ligament and Meniscal Abnormalities of the Knee Joint / W. Lee, H.S. Kim, S.J. Kim [et al.] // *Korean J Radiol.* – 2004. – Vol. 5. – № 1. – P. 47–54.
101. Current trends in the anterior cruciate ligament part II: evaluation, surgical technique, prevention, and rehabilitation / V. Musahl, I.D. Engler, E.M. Nazzal [et al.] // *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* – 2022. – Vol. 30. – № 1. – P. 34–51.
102. Davis, T.J. Correlation of the intercondylar notch width of the femur to the width of the anterior and posterior cruciate ligaments / T.J. Davis, K.D. Shelbourne, T.E. Klootwyk // *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* – 1999. – Vol. 7. – № 4. – P. 209–214.
103. Dejour, H. Tibial translation after anterior cruciate ligament rupture. Two radiological tests compared / H. Dejour, M. Bonnin // *J Bone Joint Surg Br.* – 1994. – Vol. 76. – № 5. – P. 745–749.

104. Descriptive epidemiology of the multicenter ACL revision study (MARS) cohort / MARS Group; R.W. Wright, L.J. Huston, K.P. Spindler [et al.] // *Am J Sports Med.* – 2010. – Vol. 38. – № 10. – P. 1979–1986.
105. Diagnostic accuracy of history taking and physical examination for assessing anterior cruciate ligament lesions of the knee in primary care / H.P. Wagemakers, P.A. Luijsterburg, S.S. Boks [et al.] // *Arch Phys Med Rehabil.* – 2010. – Vol. 91. – № 9. – P. 1452–1459.
106. Diagnostic and therapeutic joint injections / S. Masala, R. Fiori, D.A. Bartolucci [et al.] // *Semin Intervent Radiol.* – 2010. – Vol. 27. – № 2. – P. 160–171.
107. Distribution of in situ forces in the anterior cruciate ligament in response to rotatory loads / M.T. Gabriel, E.K. Wong, S.L. Woo [et al.] // *J Orthop Res.* – 2004. – Vol. 22. – № 1. – P. 85–89.
108. Do psychosocial interventions improve rehabilitation outcomes after anterior cruciate ligament reconstruction? A systematic review / R.A. Coronado, M.L. Bird, E.E. Van Hoy [et al.] // *Clin Rehabil.* – 2018. – Vol. 32. – № 3. – P. 287–298.
109. Donaldson, W.F. 3rd. A comparison of acute anterior cruciate ligament examinations. Initial versus examination under anesthesia / W.F. Donaldson 3rd, R.F. Warren, T. Wickiewicz // *Am J Sports Med.* – 1985. – Vol. 13. – № 1. – P. 5–10.
110. Dual-energy CT for the musculoskeletal system / P.I. Mallinson, T.M. Coupal, P.D. McLaughlin [et al.] // *Radiology.* – 2016. – Vol. 281. – № 3. – P. 690–707.
111. Dunn, K.L. Early Operative Versus Delayed or Nonoperative Treatment of Anterior Cruciate Ligament Injuries in Pediatric Patients / K.L. Dunn, K.C. Lam, T.C. Valovich McLeod // *J Athl Train.* – 2016. – Vol. 51. – № 5. – P. 425–427.
112. Dynamic Magnetic Resonance Imaging Protocol: An Effective and Useful Tool to Assess Discoid Lateral Meniscus Instability in Children / N. Cance, A. Rouchaud, A. Chousta [et al.] // *J Pediatr Orthop.* – 2024. – Vol. 44. – № 9. – P. e782–e788.
113. Dynamic MRI for articulating joint evaluation on 1.5 T and 3.0 T scanners: setup, protocols, and real-time sequences / M. Garetier, B. Borotikar, K. Makki [et al.] // *Insights Imaging.* – 2020. – Vol. 11. – № 1. – P. 66.

114. Dynamic MRI to quantify musculoskeletal motion: a systematic review of concurrent validity and reliability, and perspectives for evaluation of musculoskeletal disorders / B. Borotikar, M. Lempereur, M. Lelievre [et al.] // PLoS One. – 2017. – Vol. 12. – № 12. – P. e0189587.
115. Early integration of a bone plug in the femoral tunnel in rectangular tunnel ACL reconstruction with a bone-patellar tendon-bone graft: a prospective computed tomography analysis / T. Suzuki, K. Shino, S. Nakagawa [et al.] // Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc. – 2011. – Vol. 19. – Suppl. 1. – P. S29–35.
116. Effect of tibial tunnel position on stability of the knee after anterior cruciate ligament reconstruction: is the tibial tunnel position most important? / A. Bedi, T. Maak, V. Musahl [et al.] // Am J Sports Med. – 2011. – Vol. 39. – № 2. – P. 366–373.
117. Effectiveness and safety of cryotherapy after arthroscopic anterior cruciate ligament reconstruction. A systematic review of the literature / A.L. Martimbianco, B.N. Gomes da Silva, A.P. de Carvalho [et al.] // Phys Ther Sport. – 2014. – Vol. 15. – № 4. – P. 261–268.
118. Effects of neuromuscular training on knee proprioception in individuals with anterior cruciate ligament injury: a systematic review and GRADE evidence synthesis / A. Arumugam, M. Björklund, S. Mikko, C.K. Häger // BMJ Open. – 2021. – Vol. 11. – № 5. – P. e049226.
119. Effects of Whole-Body Vibration Therapy on Quadriceps Function in Patients with Anterior Cruciate Ligament Reconstruction: A Systematic Review / J. Qiu, M.T. Ong, H.T. Leong [et al.] // Sports Health. – 2022. – Vol. 14. – № 2. – P. 216–226.
120. El Adalany, M.A. The role of magnetic resonance imaging (MRI) in assessment of ACL graft failure / M.A. El Adalany, A.A.S. Sakarana, S.A. Fattah // Egypt J Radiol Nucl Med. – 2017. – Vol. 48. – № 4. – P. 961–969.
121. ElSayed, M. Use of oblique sagittal and coronal weighted images for diagnosis and grading of ACL graft injury / M. ElSayed, A.S. Rashwan, H. Kamal // Egypt J Radiol Nucl Med. – 2022. – Vol. 53. – № 1. – P. 121.

122. Epidemiology of Anterior Cruciate Ligament Tears in National Collegiate Athletic Association Athletes / D.R. Dewig, A.J. Boltz, R.E. Moffit [et al.] // *Med Sci Sports Exerc.* – 2024. – Vol. 56. – № 1. – P. 29–36.
123. Evaluation of ACL Graft by MRI: A Pictorial Review / S. Velicheti, A. Ramadugu, K. Chalasani [et al.] // *J Glob Radiol.* – 2022. – Vol. 8. – № 1. – doi: <https://doi.org/10.7191/jgr.2022.1151>
124. Evaluation of arthroscopy versus MRI efficacy in diagnosing ACL tear and meniscus tear: a prospective analysis / P.V.B. Reddy, V. Surparaju, P.H.K. Raghavendra, H.S. Byatroy // *Journal of Population Therapeutics and Clinical Pharmacology.* – 2025. – Vol. 32. – № 1. – P. 1284–1293.
125. Evaluation of patellar tracking in patients with suspected patellar malalignment: cine MR imaging vs arthroscopy / J. Brossmann, C. Muhle, C.C. Büll [et al.] // *AJR Am J Roentgenol.* – 1994. – Vol. 162. – № 2. – P. 361–367.
126. Evaluation of the accuracy of Lachman and Anterior Drawer Tests with KT1000 in the follow-up of anterior cruciate ligament surgery / B.E. Kilinc, A. Kara, H. Celik [et al.] // *J Exerc Rehabil.* – 2016. – Vol. 12. – № 4. – P. 363–367.
127. Evaluation of the reproducibility of the KT-1000 arthrometer / N. Sernert, J. Kartus, K. Köhler [et al.] // *Scand J Med Sci Sports.* – 2001. – Vol. 11. – № 2. – P. 120–125.
128. Evans, J. Anterior Cruciate Ligament Knee Injury / J. Evans, A. Mabrouk, J.L. Nielson. – Treasure Island (FL): StatPearls Publishing, 2026. – URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/29763023/> – Текст: электронный. (Дата обращения: 20.03.2026)
129. Exploring the Utility of PET and Dynamic Bone Imaging in Evaluation of ACL Reconstruction / N. Wojnowski, A. Sheppard, F. Farhadi, B. Saboury // *J Nucl Med.* – 2023. – Vol. 64. – Suppl. 1. – P. 805.
130. Extracellular matrix-blood composite injection reduces post-traumatic osteoarthritis after anterior cruciate ligament injury in the rat / B.L. Proffen, J.T. Sieker, M.M. Murray [et al.] // *J Orthop Res.* – 2016. – Vol. 34. – № 6. – P. 995–1003.

131. Factors associated with anterior cruciate ligament injury: history in female athletes / L.C. Kramer, C.R. Denegar, W.E. Buckley, J. Hertel // *J Sport Med Phys Fitness*. – 2007. – Vol. 47. – № 4. – P. 446–454.
132. Factors that influence the intraarticular rupture pattern of the ACL graft following single-bundle reconstruction / C.F. Van Eck, E.J. Kropf, J.R. Romanowski [et al.] // *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* – 2011. – Vol. 19. – № 8. – P. 1243–1248.
133. Failure of Anterior Cruciate Ligament Reconstruction / G. Samitier, A.I. Marcano, E. Alentorn-Geli [et al.] // *Arch Bone Jt Surg.* – 2015. – Vol. 3. – № 4. – P. 220–240.
134. Feasibility of Ultra-Low Dose PET/CT for Evaluation of ACL Grafts Using a Next Generation Digital Detector / K. Binzel, R. Magnussen, D. Flanigan [et al.] // *J Nucl Med.* – 2016. – Vol. 57. – Suppl. 2. – P. 1005.
135. Filbay, S.R. Evidence-based recommendations for the management of anterior cruciate ligament (ACL) rupture / S.R. Filbay, H. Grindem // *Best Pract Res Clin Rheumatol.* – 2019. – Vol. 33. – № 1. – P. 33–47.
136. Fok, A.W. Associations between isolated bundle tear of anterior cruciate ligament, time from injury to surgery, and clinical tests / A.W. Fok, W.P. Yau // *J Orthop Surg (Hong Kong)*. – 2014. – Vol. 22. – № 2. – P. 209–213.
137. Fuchs, S. Sonographic evaluation of ACL rupture signs compared to arthroscopic findings in acutely injured knees / S. Fuchs, C. Chylarecki // *Ultrasound Med Biol.* – 2002. – Vol. 28. – № 2. – P. 149–154.
138. Functional MRI of the patellofemoral joint: comparison of ultrafast MRI, motion-triggered cine MRI and static MRI / C. Muhle, J. Brossmann, U.H. Melchert [et al.] // *Eur Radiol.* – 1995. – Vol. 5. – P. 371–378.
139. Functional ultrasonography in diagnosing anterior cruciate ligament injury as compared to magnetic resonance imaging / S. Kumar, A. Kumar, S. Kumar, P. Kumar // *Indian J Orthop.* – 2018. – Vol. 52. – № 6. – P. 638–644.
140. Garth, W.P. Jr. The lateral notch sign associated with acute anterior cruciate ligament disruption / W.P. Garth Jr, J. Greco, M.A. House // *Am J Sports Med.* – 2000. – Vol. 28. – № 1. – P. 68–73.

141. Generalized joint hypermobility and risk of lower limb joint injury during sport: a systematic review with meta-analysis / V. Pacey, L.L. Nicholson, R.D. Adams [et al.] // *Am J Sports Med.* – 2010. – Vol. 38. – № 7. – P. 1487–1497.
142. George, M.S. Current concepts review: revision anterior cruciate ligament reconstruction / M.S. George, W.R. Dunn, K.P. Spindler // *Am J Sports Med.* – 2006. – Vol. 34. – № 12. – P. 2026–2037.
143. Giuliani, J.R. Anterior cruciate ligament anatomy: a review of the anteromedial and posterolateral bundles / J.R. Giuliani, K.G. Kilcoyne, J.P. Rue // *J Knee Smug.* – 2009. – Vol. 22. – № 2. – P. 148–154.
144. 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 Musculoskelet Disord.* – 2022. – Vol. 23. – № 1. – P. 332.
145. Goldman, A.B. The Second fracture of the proximal tibia: a small avulsion that reflects major ligamentous damage / A.B. Goldman, H. Pavlov, D. Rubenstein // *AJR Am J Roentgenol.* – 1988. – Vol. 151. – № 6. – P. 1163–1167.
146. Hall, F.M. Radiographic Diagnosis and Accuracy in Knee Joint Effusions / F.M. Hall // *Radiology.* – 1975. – Vol. 115. – № 1. – P. 49–54.
147. Hall, F.M. Radiographic Features of Anterior Cruciate Ligament Tear / F.M. Hall // *Radiology.* – 2002. – Vol. 222. – № 2. – P. 576.
148. Hamstring Autograft Versus Patellar Tendon Autograft for ACL Reconstruction: Is There a Difference in Graft Failure Rate? A Meta-Analysis of 47,613 Patients / B.T. Samuelsen, K.E. Webster, N.R. Johnson [et al.] // *Clin Orthop Relat Res.* – 2017. – Vol. 475. – № 10. – P. 2459–2468.
149. Hartnett, N. Delay in diagnosis of anterior cruciate ligament injury in sport / N. Hartnett, R.J. Tregonning // *N Z Med J.* – 2001. – Vol. 14. – № 1124. – P. 11–13.
150. Hewett, T.E. Diagnosis of complete and partial posterior cruciate ligament ruptures. Stress radiography compared with KT-1000 arthrometer and posterior drawer testing / T.E. Hewett, F.R. Noyes, M.D. Lee // *Am J Sports Med.* – 1997. – Vol. 25. – № 5. – P. 648–655.

151. High prevalence of a deep lateral femoral notch sign in patients with anterior cruciate ligament (ACL) and concomitant posterior root tears of the lateral meniscus / D.P. Berthold, L.N. Muench, E. Herbst [et al.] // *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* – 2021. – Vol. 29. – № 4. – P. 1018–1024.
152. High-resolution oblique coronal MRI at optimal flexed-knee angle: a novel imaging method for enhanced anterior cruciate ligament tear diagnosis / C. Chen, X. Liu, P. Wu [et al.] // *J Orthop Surg Res.* – 2024. – Vol. 19. – № 1. – P. 456.
153. Higher risk of ACL rupture in amateur football compared to professional football: 5-year results of the 'Anterior cruciate ligament-registry in German football' / D. Szymiski, L. Achenbach, J. Zellner [et al.] // *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* – 2022. – Vol. 30. – № 5. – P. 176–1785.
154. Hootman, J.M. Epidemiology of collegiate injuries for 15 sports: summary and recommendations of injury prevention initiatives / J.M. Hootman, R. Dick, J. Agel // *J Athl Train.* – 2007. – Vol. 42. – № 2. – P. 311–319.
155. How to optimize the use of MRI in anatomic ACL reconstruction / P. Araujo, C.F. van Eck, M. Torabi, F.H. Fu // *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* – 2013. – Vol. 21. – № 7. – P. 1495–1501.
156. Imaging ACL reconstructions and their complications / P. Kulczycka, A. Larbi, J. Malghem [et al.] // *Diagn Interv Imaging.* – 2015. – Vol. 96. – № 1. – P. 11–19.
157. Imaging of anterior cruciate ligament repair and its complications / A.B. Meyers, A.H. Haims, K. Menn, H. Moukaddam // *AJR Am J Roentgenol.* – 2010. – Vol. 194. – № 2. – P. 476–484.
158. In situ forces in the anterior cruciate ligament and its bundles in response to anterior tibial loads / M. Sakane, R.J. Fox, S.L. Woo [et al.] // *J Orthop Res.* – 1997. – Vol. 15. – № 2. – P. 285–293.
159. In vivo elongation of the anterior cruciate ligament and posterior cruciate ligament during knee flexion / G. Li, L.E. DeFrate, H. Sun, T.J. Gill // *Am J Sports Med.* – 2004. – Vol. 32. – № 6. – P. 1415–1420.

160. Incidence and Prognostic Significance of the Second Fracture in Patients Undergoing Anterior Cruciate Ligament Reconstruction / I. Slagstad, A.P. Slagstad, T. Strand, E. Inderhaug // *Am J Sports Med.* – 2020. – Vol. 48. – № 5. – P. 1063–1068.
161. Increased medial tibial slope in teenage pediatric population with open physes and anterior cruciate ligament injuries / S. Vyas, C.F. van Eck, N. Vyas [et al.] // *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* – 2011. – Vol. 19. – № 3. – P. 372–377.
162. Indications requiring preoperative magnetic resonance imaging before knee arthroscopy / B.P. Roßbach, M.F. Pietschmann, M.F. Gülecyyüz [et al.] // *Arch Med Sci.* – 2014. – Vol. 10. – № 6. – P. 1147–1152.
163. Intensive supervised rehabilitation versus less supervised rehabilitation following anterior cruciate ligament reconstruction? A systematic review and meta-analysis / A.R. Gamble, E. Pappas, M. O'Keeffe [et al.] // *J Sci Med Sport.* – 2021. – Vol. 24. – № 9. – P. 862–870.
164. Ipsilateral graft and contralateral ACL rupture at five years or more following ACL reconstruction: a systematic review / R.W. Wright, R.A. Magnussen, W.R. Dunn, K.P. Spindler // *J Bone Joint Surg Am.* – 2011. – Vol. 93. – № 12. – P. 1159–1165.
165. Irie, K. Three-dimensional virtual computed tomography imaging for injured anterior cruciate ligament / K. Irie, T. Yamada // *Arch Orthop Trauma Surg.* – 2002. – Vol. 122. – № 2. – P. 93–95.
166. Is noncontact ACL injury associated with the posterior tibial and meniscal slope / R. Hudek, B. Fuchs, F. Regenfelder, P.P. Koch // *Clin Orthop Relat Res.* – 2011. – Vol. 469. – № 8. – P. 2377–2384.
167. Ito, M.M. Evaluation of tibial bone-tunnel changes with X-ray and computed tomography after ACL reconstruction using a bone-patella tendonbone autograft / M.M. Ito, S. Tanaka // *Int Orthop.* – 2006. – Vol. 30. – № 2. – P. 99–103.
168. Jackson, J.L. Evaluation of acute knee pain in primary care / J.L. Jackson, P.G. O'Malley, K. Kroenke // *Ann Intern Med.* – 2003. – Vol. 139. – № 7. – P. 575–588.
169. Jacobsen, K. Stress radiographical measurement of the anteroposterior, medial and lateral stability of the knee joint / K. Jacobsen // *Acta Orthop Scand.* – 1976. – Vol. 47. – № 3. – P. 334–335.

170. Jakob, R.P. Observations on rotatory instability of the lateral compartment of the knee. Experimental studies on the functional anatomy and the pathomechanism of the true and the reversed pivot shift sign / R.P. Jakob, H. Hassler, H.U. Staebli // *Acta Orthop Scand Suppl.* – 1981. – Vol. 191. – P. 1–32.
171. James, E.W. Stress radiography for the diagnosis of knee ligament injuries: a systematic review / E.W. James, B.T. Williams, R.F. LaPrade // *Clin Orthop Relat Res.* – 2014. – Vol. 472. – № 9. – P. 2644–2657.
172. Johnson, D.L. Anterior cruciate ligament reconstruction: why do failures occur? / D.L. Johnson, F.H. Fu // *Instr Course Lect.* – 1995. – Vol. 44. – P. 391–406.
173. Khedr, S.A. MR imaging of anterior cruciate ligament reconstruction poor outcomes / S.A. Khedr, M.A. Azab, M.M.A. Karim // *Egypt J Radiol Nucl Med.* – 2013. – Vol. 44. – № 3. – P. 597–605.
174. Kim, S.J. Anterior Cruciate Ligament Reconstruction: Autogenous Quadriceps Tendon-Bone Compared With Bone-Patellar Tendon-Bone Grafts at 2-Year Followup / S.J. Kim, P. Kumar, K.S. Oh // *Arthroscopy.* – 2009. – Vol. 25. – № 2. – P. 137–144.
175. Knee Imaging Following Anterior Cruciate Ligament Reconstruction: The Surgeon's and Radiologist's Perspectives / R. Srinivasan, J. Wan, C.R. Allen, L.S. Steinbach // *Semin Musculoskelet Radiol.* – 2018. – Vol. 22. – № 4. – P. 386–397.
176. Kvist, J. Knee-Related Quality of Life Compared Between 20 and 35 Years After an Anterior Cruciate Ligament Injury Treated Surgically with Primary Repair or Reconstruction, or Nonsurgically / J. Kvist, M. Pettersson // *Am J Sports Med.* – 2024. – Vol. 52. – № 2. – P. 311–319.
177. Load-dependent variations in knee kinematics measured with dynamic MRI / C.J. Westphal, A. Schmitz, S.B. Reeder, D.G. Thelen // *J Biomech.* – 2013. – Vol. 46. – № 12. – P. 2045–2052.
178. Loudon, J.K. The relationship between static posture and ACL injury in female athletes / J.K. Loudon, W. Jenkins, K.L. Loudon // *J Orthop Sports Phys Ther.* – 1996. – Vol. 24. – № 2. – P. 91–97.

179. Luc, B. Osteoarthritis prevalence following anterior cruciate ligament reconstruction: a systematic review and numbers-needed-to-treat analysis / B. Luc, P.A. Gribble, B.G. Pietrosimone // *J Athl Train.* – 2014. – Vol. 49. – № 6. – P. 806–819.
180. Magnetic resonance imaging after anterior cruciate ligament reconstruction: A practical guide / A. Grassi, J.R. Bailey, C. Signorelli [et al.] – 2016. – Vol. 7. – № 10. – P. 638–649.
181. Methods to diagnose acute anterior cruciate ligament rupture: a meta-analysis of instrumented knee laxity tests / C.F. Van Eck, M. Loopik, M.P. van den Bekerom [et al.] // *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* – 2013. – Vol. 21. – № 9. – P. 1989–1997.
182. Meyers, M.H. Fracture of the intercondylar eminence of the tibia / M.H. Meyers, F.M. McKeever // *J Bone Joint Surg Am.* – 1970. – Vol. 52. – № 8. – P. 1677–1684.
183. MR evaluation of the "arcuate" sign of posterolateral knee instability / S.K. Juhng, J.K. Lee, S.S. Choi [et al.] // *AJR Am J Roentgenol.* – 2002. – Vol. 178. – № 3. – P. 583–588.
184. Multidetector computed tomography arthrography of the knee: diagnostic accuracy and indications / M. De Filippo, A. Bertellini, F. Pogliacomì [et al.] // *Eur J Radiol.* – 2009. – Vol. 70. – № 2. – P. 342–351.
185. Multidetector computed tomography in acute knee injuries: assessment of cruciate ligaments with magnetic resonance imaging correlation / A.O. Mustonen, M.P. Koivikko, V.V. Haapamaki [et al.] // *Acta Radiol.* – 2007. – Vol. 48. – № 1. – P. 104–111.
186. Nebelung, W. Thirty-five years of follow-up of anterior cruciate ligament-deficient knees in high-level athletes / W. Nebelung, H. Wuschech // *Arthroscopy.* – 2005. – Vol. 21. – № 6. – P. 696–702.
187. Neeraj, S. International Epidemiology of Anterior Cruciate Ligament Injuries / S. Neeraj // *Ortho Res Online J.* – 2018. – Vol. 1. – № 5. – P. 94–96.
188. Neuromuscular electrical stimulation is effective in strengthening the quadriceps muscle after anterior cruciate ligament surgery / A.V. Hauger, M.P. Reiman, J.M. Bjordal [et al.] // *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* – 2018. – Vol. 26. – № 2. – P. 399–410.

189. New dynamic three-dimensional MRI technique for shoulder kinematic analysis / J. Pierrart, M.M. Lefèvre-Colau, W. Skalli [et al.] // *J Magn Reson Imaging*. – 2014. – Vol. 39. – № 3. – P. 729–734.
190. Optimal Graft Choice in Athletic Patients with Anterior Cruciate Ligament Injuries: Review and Clinical Insights / K. Sim, R. Rahardja, M. Zhu, S.W. Young // *Open Access J Sports Med*. – 2022. – Vol. 13. – P. 55–67.
191. Orthopaedic Section of the American Physical Therapist A. Knee stability and movement coordination impairments: knee ligament sprain / D.S. Logerstedt, L. Snyder-Mackler, R.C. Ritter [et al.] // *J Orthop Sports Phys Ther*. – 2010. – Vol. 40. – № 4. – P. A1–A37.
192. Outcome of revision anterior cruciate ligament reconstruction: a systematic review / R.W. Wright, C.S. Gill, L. Chen [et al.] // *J Bone Joint Surg Am*. – 2012. – Vol. 94. – № 6. – P. 531–536.
193. Pao, D.G. The lateral femoral notch sign / D.G. Pao // *Radiology*. – 2001. – Vol. 219. – № 3. – P. 800–801.
194. Partial and complete tear of the anterior cruciate ligament: direct and indirect MR signs / W.T. Chen, T.T. Shih, H.Y. Tu [et al.] // *Acta Radiol*. – 2002. – Vol. 43. – № 5. – P. 511–516.
195. Partial meniscectomy and anterior cruciate ligament rupture in soccer players. A study with a minimum 20-year followup / P. Neyret, S.T. Donell, D. DeJour, H. DeJour // *Am J Sports Med*. – 1993. – Vol. 21. – № 3. – P. 455–460.
196. Partial tear of the anterior cruciate ligament of the knee: injury patterns on MR imaging / P. Van Dyck, E. De Smet, J. Veryser [et al.] // *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*. – 2012. – Vol. 20. – № 2. – P. 256–261.
197. Pediatric tibial eminence fractures: Evaluation and management / R.M. LaFrance, B. Giordano, J. Goldblatt [et al.] // *J Am Acad Orthop Surg*. – 2010. – Vol. 18. – № 7. – P. 395–405.
198. Peeler, J. Accuracy and reliability of anterior cruciate ligament clinical examination in a multidisciplinary sports medicine setting / J. Peeler, J. Leiter, P. MacDonald // *Clin J Sports Med*. – 2010. – Vol. 20. – № 2. – P. 80–85.

199. Peltola, E.K. Dual-energy computed tomography of cruciate ligament injuries in acute knee trauma / E.K. Peltola, S.K. Koskinen // *Skeletal Radiol.* – 2015. – Vol. 44. – № 9. – P. 1295–1301.
200. Powers, C.M. Quantification of patellar tracking using kinematic MRI / C.M. Powers, F.G. Shellock, M. Pfaff // *J Magn Reson Imaging.* – 1998. – Vol. 8. – № 3. – P. 724–732.
201. Pramod, V.K. Clinicoradiological and arthroscopic correlation of "lever sign test" in diagnosis of isolated anterior cruciate ligament rupture / V.K. Pramod, J. Krishnan, I. Shah // *International Journal of Scientific Research.* – 2020. – Vol. 9. – № 5. – P. 17–18.
202. Prasad, J.R. Anterior cruciate ligament tears: primary and secondary signs at MR imaging / J.R. Prasad, R. Priyadarshini, S.V. Davra // *International Journal of Radiology and Diagnostic Imaging.* – 2021. – Vol. 4. – № 3. – P. 29–33.
203. Prevalence of tibiofemoral osteoarthritis 15 years after nonoperative treatment of anterior cruciate ligament injury: A prospective cohort study / P. Neuman, M. Englund, I. Kostogiannis [et al.] // *Am J Sports Med.* – 2008. – Vol. 36. – № 9. – P. 1717–1725.
204. Primary anatomic doublebundle anterior cruciate ligament reconstruction: a preliminary 2-year prospective study / F.H. Fu, W. Shen, J.S. Starman [et al.] // *Am J Sports Med.* – 2008. – Vol. 36. – № 7. – P. 1263–1274.
205. Radiographic assessment of instability of the knee due to rupture of the anterior cruciate ligament. A quadriceps-contraction technique / J.L. Franklin, T.D. Rosenberg, L.E. Paulos, E.P. France // *J Bone Joint Surg Am.* – 1991. – Vol. 73. – № 3. – P. 365–372.
206. Real-time MRI of joint movement with trueFISP / H.H. Quick, M.E. Ladd, M. Hoevel [et al.] // *J Magn Reson Imaging.* – 2002. – Vol. 15. – № 6. – P. 710–715.
207. Rebranding the 'anatomic' ACL reconstruction: Current concepts / K.A. Borque, M.S. Laughlin, V.H. Pinheiro [et al.] // *J ISAKOS.* – 2023. – Vol. 8. – № 1. – P. 23–28.
208. Rectus femoris knee muscle moment arms measured in vivo during dynamic motion with real-time magnetic resonance imaging / N.M. Fiorentino, J.S. Lin, K.B. Ridder [et al.] // *J Biomech Eng.* – 2013. – Vol. 135. – № 4. – P. 044501.

209. Rehabilitation versus surgical reconstruction for non-acute anterior cruciate ligament injury (ACL SNNAP): a pragmatic randomised controlled trial / D.J. Beard, L. Davies, J.A. Cook [et al.]; ACL SNNAP Study Group // *Lancet*. – 2022. – Vol. 400. – № 10352. – P. 605–615.
210. Reliability of the KT1000 arthrometer and the Lachman test in patients with an ACL rupture / S.H. Wiertsema, H.J. van Hooff, L.A. Migchelsen, M.P. Steultjens // *Knee*. – 2008. – Vol. 15. – № 2. – P. 107–110.
211. Return to play, performance, and career duration after anterior cruciate ligament rupture: A case-control study in the five biggest football nations in Europe / D. Niederer, T. Engeroff, J. Wilke [et al.] // *Scand J Med Sci Sports*. – 2018. – Vol. 28. – № 10. – P. 2226–2233.
212. Risk factors associated with noncontact injury of the anterior cruciate ligament: a prospective four-year evaluation of 859 West Point cadets / J.M. Uhorchak, C.R. Scoville, G.N. Williams [et al.] // *Am J Sports Med*. – 2003. – Vol. 31. – № 6. – P. 831–842.
213. Risk factors for anterior cruciate ligament injury: a review of the literature - part 1: neuromuscular and anatomic risk / H.C. Smith, P. Vacek, R.J. Johnson [et al.] // *Sports Health*. – 2012. – Vol. 4. – № 1. – P. 69–78.
214. Risk of Secondary Injury in Younger Athletes After Anterior Cruciate Ligament Reconstruction: A Systematic Review and Meta-Analysis / A.J. Wiggins, R.K. Grandhi, D.K. Schneider [et al.] // *Am J Sports Med*. – 2016. – Vol. 44. – № 7. – P. 1861–1876.
215. Rotational knee laxity in anterior cruciate ligament deficiency: an additional secondary sign on MRI / E.E. Vassalou, M.E. Klontzas, G.K. Kouvidis [et al.] // *AJR Am J Roentgenol*. – 2016. – Vol. 206. – № 1. – P. 151–154.
216. Scott, N.W. *Insall & Scott surgery of the knee* / W. Norman Scott. – 6th ed. – Elsevier, 2017. – 2360 p. – ISBN: 978-0323400466. – Текст: непосредственный.
217. Sensitivity of DECT in ACL tears. A prospective study with arthroscopy as reference method / A.S. Björkman, H. Gauffin, A. Persson, S.P. Koskinen // *Acta Radiol Open*. – 2022. – Vol. 11. – № 3. – P. 20584601221075799.

218. Shallow medial tibial plateau and steep medial and lateral tibial slopes: new risk factors for anterior cruciate ligament injuries / J. Hashemi, N. Chandrashekar, H. Mansouri [et al.] // *Am J Sports Med.* – 2010. – Vol. 38. – № 1. – P. 54–62.
219. Shelbourne, K.D. The relationship between intercondylar notch width of the femur and the incidence of anterior cruciate ligament tears. A prospective study / K.D. Shelbourne, T.J. Davis, T.E. Klootwyk // *Am J Sports Med.* – 1998. – Vol. 26. – № 3. – P. 402–408.
220. Societal and Economic Impact of Anterior Cruciate Ligament Tears / R.C. Mather 3rd, L. Koenig, M.S. Kocher [et al.] // *J Bone Joint Surg Am.* – 2013. – Vol. 95. – № 19. – P. 1751–1759.
221. Sonography of the Normal Anterior Cruciate Ligament: A Preliminary Report / P.T. Chen, C.H. Wu, C.W. Yu [et al.] // *J Med Ultrasound.* – 2013. – Vol. 21. – № 1. – P. 16–20.
222. Soo, A. Measuring Observer Agreement on Categorical Data (Doctoral thesis, University of Calgary, Calgary, Canada) / A. Soo. – 2015. – URL: <https://ucalgary.scholaris.ca/items/7a6da985-ebce-45b9-9bee-08c86ac3c78d> – Текст: электронный. (Дата обращения: 20.03.2026)
223. Souryal, T.O. Bilaterality in anterior cruciate ligament injuries: associated intercondylar notch stenosis / T.O. Souryal, H.A. Moore, J.P. Evans // *Am J Sports Med.* – 1988. – Vol. 16. – № 5. – P. 449–454.
224. SPECT/CT tracer uptake is influenced by tunnel orientation and position of the femoral and tibial ACL graft insertion site / M.T. Hirschmann, D. Mathis, H. Rasch [et al.] // *Int Orthop.* – 2013. – Vol. 37. – № 2. – P. 301–309.
225. Spiral computed tomographic (CT) arthrography versus arthroscopy in internal derangements of the knee / M. Hadj-Salah, S. Mourali, M.A. Abdelali [et al.] // *Tunis Med.* – 2006. – Vol. 84. – № 11. – P. 734–737.
226. Spiral CT arthrography of the knee: technique and value in the assessment of internal derangement of the knee / B.C. Vande Berg, F.E. Lecouvet, P. Poilvache [et al.] // *Eur Radiol.* – 2002. – Vol. 12. – № 7. – P. 1800–1810.

227. Stäubli, H.U. Stress radiography of the knee. Cruciate ligament function studied in 138 patients / H.U. Stäubli, B. Noesberger, R.P. Jakob // *Acta Orthop Scand Suppl.* – 1992. – Vol. 249. – P. 1–27.
228. Stoller, D.W. Magnetic resonance imaging in orthopedics and sports medicine / D.W. Stoller. – 3rd ed. – Philadelphia: Lippincott Williams & Wilkins, 2006. – 2336 p. – ISBN: 9780781773577. – Текст: непосредственный.
229. Stress radiography and posterior pathological laxity of knee: comparison between two different techniques / R. Garofalo, G.C. Fanelli, A. Cikes [et al.] // *Knee.* – 2009. – Vol. 16. – № 4. – P. 251–255.
230. Strub, W.M. The arcuate sign / W.M. Strub // *Radiology.* – 2007. – Vol. 244. – № 2. – P. 620–621.
231. Supplement Use in Patients Undergoing Anterior Cruciate Ligament Reconstruction: A Systematic Review / D.N. Greif, C.P. Emerson, P. Allegra [et al.] // *Arthroscopy.* – 2020. – Vol. 36. – № 9. – P. 2537–2549.
232. Sutton, K.M, Anterior cruciate ligament rupture: differences between males and females / K.M. Sutton, J.M. Bullock // *J Am Acad Orthop Surg.* – 2013. – Vol. 21. – № 1. – P. 41–50.
233. Systematic review of singlebundle anterior cruciate ligament reconstruction outcomes: a baseline assessment for consideration of double-bundle techniques / P.B. Lewis, A.D. Parameswaran, J.P. Rue, B.R. Bach Jr // *Am J Sports Med.* – 2008. – Vol. 36. – № 10. – P. 2028–2036.
234. 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 [et al.] // *Br J Sports Med.* – 2020. – Vol. 54. – № 23. – P. 1423–1432.
235. Tewari, A. Single photon emission computed tomography in detection of anterior cruciate ligament tear / A. Tewari, S. Padma, P.S. Sundaram // *Indian J Nucl Med.* – 2012. – Vol. 27. – № 3. – P. 211–212.

236. The “Lever Sign”: a new clinical test for the diagnosis of anterior cruciate ligament rupture / A. Lelli, R.P. Di Turi, D.B. Spenciner, M. Dòmini // *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* – 2016. – Vol. 24. – № 9. – P. 2794–2797.
237. The accuracy of MRI in the diagnosis of anterior cruciate ligament injury / M. Zhao, Y. Zhou, J. Chang [et al.] // *Ann Translat Med.* – 2020. – Vol. 8. – № 24. – P. 1657.
238. The ACL graft has different cross-sectional dimensions compared with the native ACL / R. Thein, E. Spitzer, J. Doyle [et al.] // *Am J Sports Med.* – 2016. – Vol. 44. – № 8. – P. 2097–2105.
239. The angle of the lower portion of the posterior cruciate ligament assists in the diagnosis of partial anterior cruciate ligament tears / Y. Yang, B. Zheng, M. Zhang [et al.] // *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* – 2024. – Vol. 32. – № 11. – P. 3015–3022.
240. The arthroscopical and radiological corelation of lever sign test for the diagnosis of anterior cruciate ligament rupture / A. Deveci, D. Cankaya, S. Yilmaz [et al.] // *Springerplus.* – 2015. – Vol. 4. – P. 830.
241. The diagnostic accuracy of clinical tests for anterior cruciate ligament tears is 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 Surg Sports Traumatol Arthrosc.* – 2022. – Vol. 30. – № 10. – P. 3287–3303.
242. The diagnostic accuracy of magnetic resonance imaging for anterior cruciate ligament injury in comparison to arthroscopy: a meta-analysis / K. Li, J. Du, L.X. Huang [et al.] // *Sci Rep.* – 2017. – Vol. 7. – № 1. – P. 7583.
243. The diagnostic accuracy of ultrasound in assessing anterior cruciate ligament tears: a systematic review and meta-analysis / G. Schreiner, S. Fucaloro, M. Ward [et al.] // *Skeletal Radiol.* – 2025. – Vol. 54. – № 8. – P. 1631–1642.
244. The effect of knee bracing on the knee function and stability following anterior cruciate ligament reconstruction: A systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials / X.G. Yang, J.T. Feng, X. He [et al.] // *Orthop Traumatol Surg Res.* – 2019. – Vol. 105. – № 6. – P. 1107–1114.

245. The effectiveness of preoperative rehabilitation programmes on postoperative outcomes following anterior cruciate ligament (ACL) reconstruction: a systematic review / H.M. Carter, C. Littlewood, K.E. Webster, B.E. Smith // *BMC Musculoskelet Disord.* – 2020. – Vol. 21. – № 1. – P. 647.
246. The effects of core proprioception on knee injury: a prospective biomechanical-epidemiological study / B.T. Zazulak, T.E. Hewett, N.P. Reeves [et al.] // *Am J Sports Med.* – 2007. – Vol. 35. – № 3. – P. 368–373.
247. The effects of generalized joint laxity on risk of anterior cruciate ligament injury in young female athletes / G.D. Myer, K.R. Ford, M.V. Paterno [et al.] // *Am J Sports Med.* – 2008. – Vol. 36. – № 6. – P. 1073–1080.
248. The effects of social determinants of health on anterior cruciate ligament injury recovery / L. Troyer, A. Voshage, K. Rucinski [et al.] // *J Orthop.* – 2024. – Vol. 59. – P. 90–96.
249. The Pivot Shift: Current Experimental Methodology and Clinical Utility for Anterior Cruciate Ligament Rupture and Associated Injury / N.J. Vaudreuil, B.B. Rothrauff, D. de Sa, V. Musahl // *Curr Rev Musculoskelet Med.* – 2019. – Vol. 12. – № 1. – P. 41–49.
250. The presence of proprioceptive mechanoreceptors in the remnants of the ruptured ACL as a possible source of re-innervation of the ACL autograft / A.D. Georgoulis, L. Pappa, U. Moebius [et al.] // *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* – 2001. – Vol. 9. – № 6. – P. 364–368.
251. The relationship between posterior tibial slope and anterior cruciate ligament injuries / M.S. Todd, S. Lalliss, E. Garcia [et al.] // *Am J Sports Med.* – 2010. – Vol. 38. – № 1. – P. 63–67.
252. The role of the iliotibial band during the pivot shift test / E.M. Suero, I.U. Njoku, M.R. Voigt [et al.] // *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* – 2013. – Vol. 21. – № 9. – P. 2096–2100.
253. The role of ultrasonography in the diagnosis of anterior cruciate ligament injury: a systematic review and meta-analysis / J. Wang, H. Wu, F. Dong [et al.] // *Eur J Sport Sci.* – 2018. – Vol. 18. – № 4. – P. 579–586.

254. Three distinct mechanisms predominate in non-contact anterior cruciate ligament injuries in male professional football players: a systematic video analysis of 39 cases / M. Waldén, T. Krosshaug, J. Bjørneboe [et al.] // *Br J Sports Med.* – 2015. – Vol. 49. – № 22. – P. 1452–1460.
255. Three tesla magnetic resonance imaging of the anterior cruciate ligament of the knee: can we differentiate complete from partial tears? / P. Van Dyck, F.M. Vanhoenacker, J.L. Gielen [et al.] // *Skeletal Radiol.* – 2011. – Vol. 40. – № 6. – P. 701–707.
256. Tibial tunnel enlargement following anterior cruciate ligament reconstruction with patellar tendon autograft / C. Fink, M. Zapp, K.P. Benedetto [et al.] // *Arthroscopy.* – 2001. – Vol. 17. – № 2. – P. 138–143.
257. Tjoumakaris, F.P. Partial tears of the anterior cruciate ligament: diagnosis and treatment / F.P. Tjoumakaris, D.J. Donegan, J.K. Sekiya // *Am J Orthop (Belle Mead NJ).* – 2011. – Vol. 40. – № 2. – P. 92–97.
258. Torg, J.S. Clinical diagnosis of anterior cruciate ligament instability in the athlete / J.S. Torg, W. Conrad, V. Kalen // *Am J Sports Med.* – 1976. – Vol. 4. – № 2. – P. 84–93.
259. Translation and rotation analysis based on stress MRI for the diagnosis of anterior cruciate ligament tears / W. Klön, M. Domzalski, K. Malinowski, B. Sadlik // *Quant Imaging Med Surg.* – 2022. – Vol. 12. – № 1. – P. 257–268.
260. Treatment after anterior cruciate ligament injury: Panther Symposium ACL Treatment Consensus Group / T. Diermeier, B.B. Rothrauff, L. Engebretsen [et al.]; Panther Symposium ACL Treatment Consensus Group // *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* – 2020. – Vol. 28. – № 8. – P. 2390–2402.
261. Unhappy triad of the knee: What are the current concepts and opinions? / A.H. Hoveidaei, R. Sattarpour, H. Dadgostar [et al.] // *World J Orthop.* – 2023. – Vol. 14. – № 5. – P. 268–274.
262. Use of the quadriceps active test to diagnose posterior cruciate-ligament disruption and measure posterior laxity of the knee / D.M. Daniel, M.L. Stone, P. Barnett, R. Sachs // *J Bone Joint Surg Am.* – 1988. – Vol. 70. – № 3. – P. 386–391.

263. Valid and reliable diagnostic performance of dual-energy CT in anterior cruciate ligament rupture / D. Liu, P. Hu, Z.J. Cai [et al.] // *Eur Radiol.* – 2023. – Vol. 33. – № 11. – P. 7769–7778.
264. Validation of an advanced practice physiotherapy model of care in an orthopaedic outpatient clinic / F. Desmeules, P. Toliopoulos, J.S. Roy [et al.] // *BMC Musculoskeletal Disorders.* – 2013. – Vol. 14. – P. 162.
265. Valsalam, P. Lever Test: Role of Its Assistance in Diagnosis of Anterior Cruciate Ligament Injury / P. Valsalam, I. Sha, A. Edwin // *J Res Orthop Sci.* – 2020. – Vol. 7. – № 3. – P. 115–120.
266. Walter, W.R. Editorial Commentary: Real-Time Dynamic Magnetic Resonance Imaging of the Patellofemoral Joint: Ready for Prime Time? / W.R. Walter, C.J. Burke // *Arthroscopy.* – 2022. – Vol. 38. – № 5. – P. 1581–1583.
267. Warren, R.F. The lateral notch sign of anterior cruciate ligament insufficiency / R.F. Warren, N. Kaplan, B.R. Bach // *Am J Knee Surg.* – 1988. – Vol. 1. – P. 119–124.
268. What does it take to have a high-grade pivot shift? / M. Tanaka, D. Vyas, G. Moloney [et al.] // *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* – 2012. – Vol. 20. – № 4. – P. 737–742.
269. Williams, J.P.G. Aetiologic classification of sports injuries / J.P.G. Williams // *Br J Sports Med.* – 1971. – Vol. 5. – № 4. – P. 228–230.
270. Wiradiputra, A.E. Peroneus longus tendon graft for anterior cruciate ligament reconstruction: A case report and review of literature / A.E. Wiradiputra, Febyan, G.N.W. Aryana // *Int J Surg Case Rep.* – 2021. – Vol. 83. – P. 106028.
271. Wu, T.J. Ultrasonographic Lever Sign: Novel Dynamic Approach for Rapid Evaluation of Anterior Cruciate Ligament Rupture in Patients / T.J. Wu, C.U. Hung // *Am J Phys Med Rehabil.* – 2024. – Vol. 103. – № 7. – P. e90.
272. Yao, S. Graft healing after anterior cruciate ligament reconstruction (ACLR) / S. Yao, B.S. Fu, P.S. Yung // *Asia Pac J Sports Med Arthrosc Rehabil Technol.* – 2021. – Vol. 25. – P. –2252.

273. Yau, W.P. Evaluation of Graft Ligamentization by MRI After Anterior Cruciate Ligament Reconstruction / W.P. Yau, Y.C. Chan // *Am J Sports Med.* – 2023. – Vol. 51. – № 6. – P. 1466–1479.
274. Zaitsev, M. Motion artifacts in MRI: A complex problem with many partial solutions / M. Zaitsev, J. Maclaren, M. Herbst // *J Magn Reson Imaging.* – 2015. – Vol. 42. – № 4. – P. 887–901.