

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

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата медицинских наук

Москва – 2026

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

Научный руководитель:

доктор медицинских наук, профессор,
академик РАН

Серова Наталья Сергеевна

Официальные оппоненты:

Труфанов Геннадий Евгеньевич – Заслуженный деятель науки РФ, доктор медицинских наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное учреждение «Национальный медицинский исследовательский центр имени В.А. Алмазова» Министерства здравоохранения Российской Федерации, кафедра лучевой диагностики и медицинской визуализации с клиникой, заведующий кафедрой; научно-исследовательский отдел лучевой диагностики, главный научный сотрудник отдела

Сергеев Николай Иванович – доктор медицинских наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение «Российский научный центр рентгенорадиологии» Министерства здравоохранения Российской Федерации, научно-исследовательский отдел комплексной диагностики заболеваний и радиотерапии, лаборатория рентгенорадиологии, заведующий лабораторией

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение «Национальный медицинский исследовательский центр травматологии и ортопедии имени Н.Н. Приорова» Министерства здравоохранения Российской Федерации

Защита диссертации состоится «17» июня 2026 г. в 10:00 часов на заседании диссертационного совета ДСУ 208.001.22 при ФГАОУ ВО Первый МГМУ имени И.М. Сеченова Минздрава России (Сеченовский Университет) по адресу: 119435, г. Москва, ул. Большая Пироговская, д. 6, стр. 1

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

Автореферат разослан «___» _____ 2026 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
кандидат медицинских наук, доцент

Павлова Ольга Юрьевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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 (S. Neeraj et al., 2018).

ПКС состоит из двух пучков: переднемедиального (ПМ) и заднелатерального (ЗЛ). ПМ пучок преимущественно ограничивает переднее смещение голени, а ЗЛ – ее ротацию (J. Giuliani et al., 2009). Попеременное натяжение каждого из пучков обеспечивает ПКС постоянное натяжение, стабилизируя коленный сустав во время нормального двигательного цикла (С.П. Миронов и соавт., 1999).

Разрывы ПКС социально значимы в связи с тем, что часто происходят у спортсменов, а также у людей, ведущих активный образ жизни. В исследовании I.M. Alardi (2023) установлено, что прямым следствием несвоевременного лечения повреждения ПКС являются разрывы менисков, коллатеральных связок и суставного хряща. Так, средняя задержка в артроскопии при травме ПКС 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.

Восстановление стабильности сустава считается основной задачей реконструкции ПКС и, хотя успешность пластики составляет от 75% до 97% (А.С. Сапрыкин и соавт., 2021), оставшиеся пациенты сталкиваются с осложнениями. В исследовании R.W. Wright et al. (2011) повторные разрывы трансплантата были зафиксированы в 24,4% случаев. Другие исследователи утверждают, что разрыв трансплантата происходит реже, в интервале 0,7–14% (F.H. Fu et al., 2008; V. Musahl et al., 2022).

Для точной визуализации ПКС и ее трансплантата *in vivo* при спорных результатах клинических тестов и сохраняющихся жалобах пациентов до сих пор необходимо прибегать к диагностической артроскопии (R. Vhanuprakash et al., 2025). Важнейшей проблемой является отсутствие эффективной методики лучевой диагностики, способной оценить функциональную состоятельность ПКС в движении, биомеханику и нестабильность в коленном суставе (С.К. Терновой и соавт., 2020).

В связи с вышеизложенным, актуальной задачей является разработка нового неинвазивного метода функциональной визуализации коленного сустава, который с высокой диагностической эффективностью позволит выявлять повреждения ПКС до и после пластики, что повлияет на тактику лечения пациентов.

Степень разработанности темы исследования

При первоначальном обращении за медицинской помощью только у 10–15% пациентов с подозрением на разрыв ПКС устанавливается правильный диагноз (M.J. Anderson et al., 2016), что задерживает хирургическое лечение и реабилитацию.

Наиболее известными клиническими тестами в мировой травматологии для выявления разрыва ПКС являются тесты переднего выдвижного ящика, Лахмана, поворотного сдвига, а также симптом рычага (Г.Д. Лазишвили, А.В. Королев, 2013; P.A. Sokal et al., 2022). Данные тесты демонстрируют высокую эффективность при застарелых, полных разрывах ПКС, в то время как для пациентов с острой травмой, болезненным и опухшим коленом чувствительность может быть меньше. Так, в исследовании A. Lelli et al. (2016) для теста Лахмана она составила 42%, переднего выдвижного ящика – 29%, поворотного сдвига – 11%.

Ведущим методом лучевой диагностики в оценке патологии связок коленного сустава остается магнитно-резонансная томография (МРТ). После пластики ПКС МРТ также выполняет важную роль для анализа биологической интеграции трансплантата, позволяет выявить повторный разрыв, атипичное положение костных каналов и другие осложнения пластики (P. Kulczycka et al., 2014). При этом чувствительность МРТ в выявлении разрывов ПКС варьирует в диапазоне 63–100%, специфичность – 68–100% (K. Li et al., 2017).

Для повышения точности диагностики разрыва ПКС до и после пластики на МРТ в большинстве исследований акцент делается на уменьшение толщины среза, модернизацию импульсных последовательностей (ИП), планирование изображений вдоль оси ПКС (A. Grassi et al., 2016; M. ElSayed et al., 2022; C. Chen et al., 2024). В то же время стандартная МРТ коленного сустава – статичная методика, а в ряде исследований было продемонстрировано повышение эффективности диагностики состояния опорно-двигательного аппарата в движении (Н.С. Серова и соавт., 2022; J.R. Prasad et al., 2021).

Современные технические возможности магнитно-резонансных (МР) томографов позволяют использовать имеющиеся ИП для проведения функциональной магнитно-резонансной томографии (фМРТ) внутренних структур коленного сустава в движении (M. Garetier et al., 2020), однако по данным литературы отсутствуют исследования, оценивающие повреждение ПКС до и после пластики с помощью фМРТ (B. Vorotikar et al., 2017).

Исходя из вышеизложенного, актуальной задачей является разработка универсальной методики и протокола фМРТ коленного сустава в движении для оценки состояния ПКС и трансплантата на высокопольных МР-томографах, отличающихся по напряженности магнитного поля, ширине апертуры гентри и производителю. Также важным представляется изучение лучевой анатомии и разработка семиотики повреждений ПКС и ее трансплантата 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

Личный вклад автора составляет 100%. 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 самостоятельно разработана и внедрена методика и протокол исследования фМРТ коленного сустава на МР-томографах 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 клиничко-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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Материалы и методы исследования

Для решения поставленных целей и задач был спланирован и реализован двухэтапный дизайн исследования.

На первом этапе для разработки методики и протокола фМРТ с 2022 по 2024 гг. было проведено многоцентровое обследование на базе четырех медицинских учреждений 32 здоровых добровольцев, без жалоб, травм и операций на коленном суставе в анамнезе, без клинических признаков повреждения ПКС. Возраст здоровых добровольцев находился в интервале от 21 до 81 года, средний возраст составил 44,4 года. Итоговое распределение здоровых добровольцев представлено в Таблице 1.

Таблица 1 – Распределение здоровых добровольцев по медицинским центрам, 100% (n = 32)

Название медицинского центра	Производитель томографа	Напряженность магнитного поля	Ширина апертуры гентри	Количество здоровых добровольцев
ФГБУ «Центральная клиническая больница с поликлиникой» Управления делами Президента РФ	General Electric, США	1,5 Тл	70 см	15,5% (n = 5)
УКБ № 1 ФГАОУ ВО Первый МГМУ имени И.М. Сеченова Минздрава России (Сеченовский Университет)	Siemens, Германия	1,5 Тл	70 см	18,8% (n = 6)
ГБУЗ «ГКБ им. М.П. Кончаловского ДЗМ»	Philips, Нидерланды	3 Тл	70 см	18,8% (n = 6)
АНО ЦКБ Святителя Алексия	General Electric, США	1,5 Тл	60 см	46,9% (n = 15)

Методику фМРТ на всех томографах выполняли следующим способом:

1. Здорового добровольца укладывали в МР-томограф в положении лежа на животе, ногами вперед. Использовали многоканальные гибкие катушки для коленного сустава, которые фиксировали вертикально вдоль его медиальной и латеральной поверхности. Важным условием являлось отсутствие поперечной фиксации между кольцами по верхнему краю катушек для свободного сгибания в суставе (Рисунок 1).

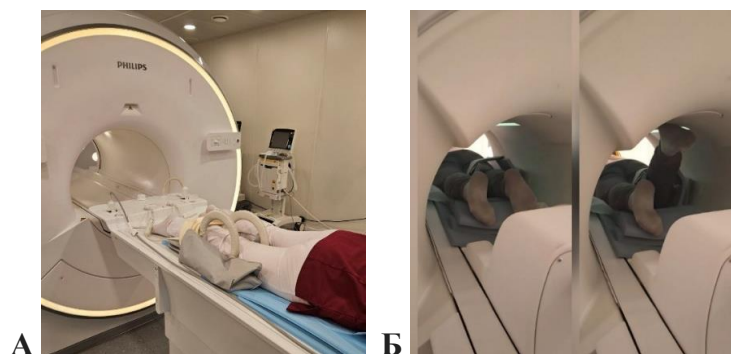


Рисунок 1 – Фотография укладки здорового добровольца на столе томографа при выполнении функциональной МРТ коленного сустава: А – перед выполнением исследования; Б – при выполнении сгибания коленного сустава

2. Осуществляли инструктаж 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 выполнял 2–3 цикла «сгибание-разгибание» в коленном суставе. В качестве ИП использовалось короткое одноимпульсное ультрабыстрое спиновое эхо с половинным-Фурье преобразованием (SS-FSE/SS-TSE/HASTE). Протокол фМРТ представлен в Таблице 2.

Таблица 2 – Протокол фМРТ коленного сустава

ИП	Короткое одноимпульсное ультрабыстрое спиновое эхо с половинным-Фурье преобразованием SS-FSE/SSH-TSE/HASTE
Толщина среза	3–5 мм
Время повторения	2000 мс
Время эха	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
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; PD – Proton Density	

3. Проводили стандартный и дополнительный локалайзеры коленного сустава вдоль центральных структур. Планировали косые сагиттальные срезы по плоскости ПКС. Угол наклона подбирался индивидуально и мог варьировать (Рисунок 2).

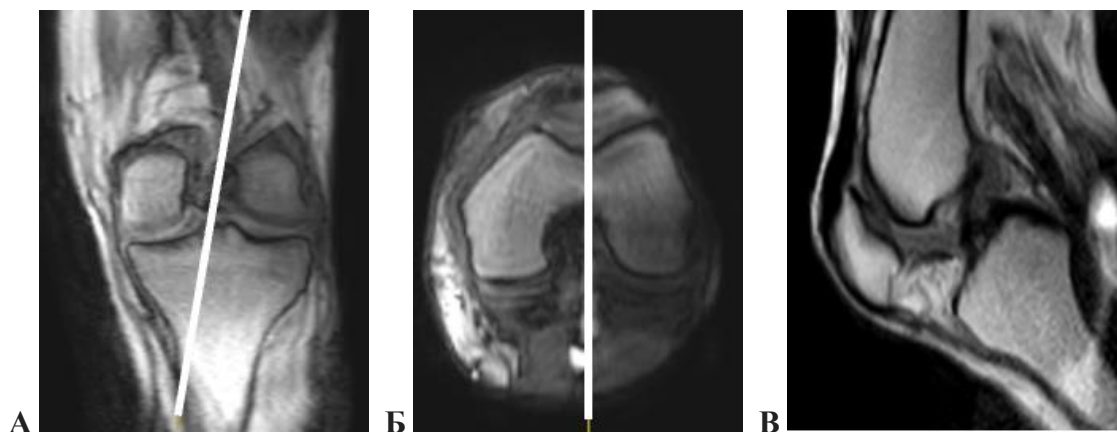


Рисунок 2 – фМРТ. А, Б: топограммы во фронтальной и аксиальной плоскостях с планированием по оси ПКС (белые линии). На фМРТ-топограммах угол наклона оси меньше, чем на стандартном МРТ из-за смещения плоскости связки при сгибании. В: фМРТ с углом сгибания коленного сустава 55° – ПКС прослеживается на всем протяжении с формированием физиологического изгиба спереди

4. Протокол исследования дополняли при необходимости псевдодинамическим режимом с фиксацией коленного сустава под определенным углом сгибания.

Стандартная МРТ коленного сустава в статическом режиме может быть выполнена в положении лежа на животе как до, так и после фМРТ в рамках одного исследования и не требует переукладки, так как полученные МР-томограммы ПКС в положении лежа на животе и на спине идентичны.

На втором этапе после отработки методики фМРТ 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. В группе пациентов с подозрением на повреждение трансплантата 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.

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, включающая рентгенографию, МРТ и фМРТ. Все МР-исследования проводились на МР-томографе Signa Creator 1,5 Тл с шириной апертуры гентри 60 см (GE HealthCare, Чикаго, США). Последовательно выполняли стандартную МРТ коленного сустава и фМРТ. Тяжесть повреждения ПКС и трансплантата ПКС оценивали по 3-балльной шкале, то есть оценками 0, 1, 2. Степень 0 соответствовала нормальным ПКС или трансплантату, степень 1 – частичный разрыв, степень 2 – полный разрыв. МРТ проводилась в среднем через 1 месяц после травмы коленного сустава.

После проведения клинико-лучевого обследования всем пациентам была выполнена артроскопия. 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. Пластика ПКС была выполнена 32 (53,3%) пациентам с подозрением на разрыв ПКС, у 3 (5%) пациентов выполнялась реконструкция только заднелатерального пучка. В группе пациентов с подозрением на повреждение трансплантата повторная пластика ПКС была выполнена у 15 (39,5%) пациентов.

Артроскопия коленного сустава являлась референсной методикой в данной научно-исследовательской работе: результаты всех МРТ и фМРТ исследований пациентов были верифицированы интраоперационно. Диагностическая эффективность и прогностическая ценность МРТ и фМРТ сравнивались на основании показателей чувствительности (S_n), специфичности (S_p), точности (A_c), прогностической ценности положительного (PPV) и отрицательного (NPV) результата, рассчитываемых по стандартным формулам с использованием программ статистической обработки данных. Значение $p < 0,01$ считали статистически значимым. Графическую оценку точности МРТ и фМРТ проводили путем построения характеристических кривых (ROC-кривых) для каждой степени повреждения ПКС и трансплантата 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.

Помимо оценки степени повреждения ПКС проводили оценку 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 каппы (k). Степень согласия интерпретировали по шкале: 0 – плохое, 0,01–0,20 – незначительное, 0,21–0,40 – удовлетворительное, 0,41–0,60 – умеренное, 0,61–0,80 – существенное согласие, 0,81–1,00 – отличное согласие.

Результаты исследований

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

Таблица 3 – Последовательности для фМРТ коленного сустава

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: 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 псевдодинамическом 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. фМРТ коленного сустава в режиме реального времени занимала не более 5–10 минут с учетом инструктажа добровольца. Между фМРТ на томографах 1,5 Тл и 3 Тл не было статистически значимых различий в скорости и качестве полученных изображений ПКС в движении ($p > 0,01$).

фМРТ позволила неинвазивно изучить на МРТ анатомию ПКС в разных положениях сгибания: ПМ пучок мощнее, напряжен в позиции сгибания, в то время как ЗЛ расслаблен; при разгибании – наоборот, ЗЛ пучок напряжен, а ПМ – расслаблен (Рисунок 3).

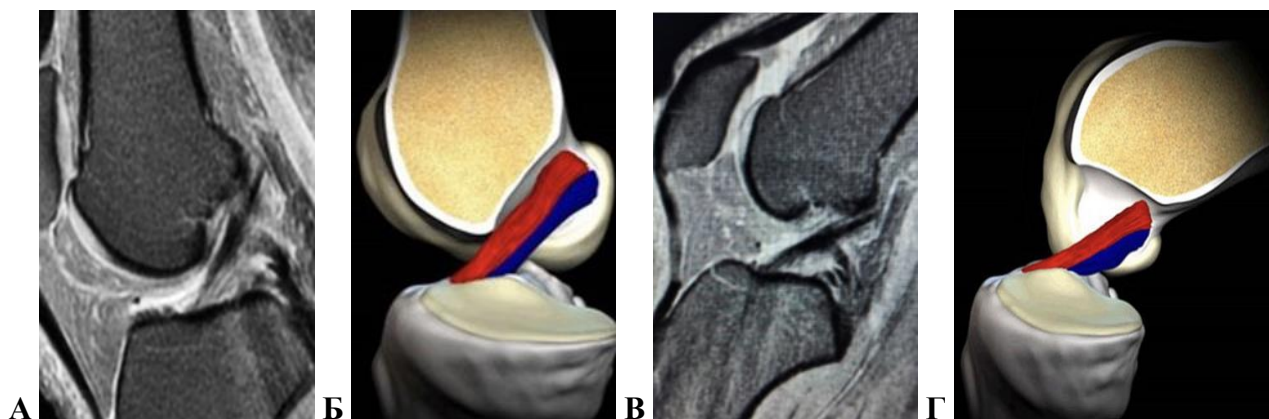


Рисунок 3 – А, В: МРТ в сагиттальной плоскости в режиме PD FS (fat saturation) в стандартной позиции (А) и фМРТ в положении сгибания на 55°(В). Б, Г: трехмерная графика: в положении разгибания отмечается расслабление ПМ (красный) и натяжение ЗЛ (синий) пучка, в положении сгибания – натяжение ПМ и расслабление ЗЛ пучка

фМРТ в движении позволила также неинвазивно изучить биомеханику ПКС: 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 4).

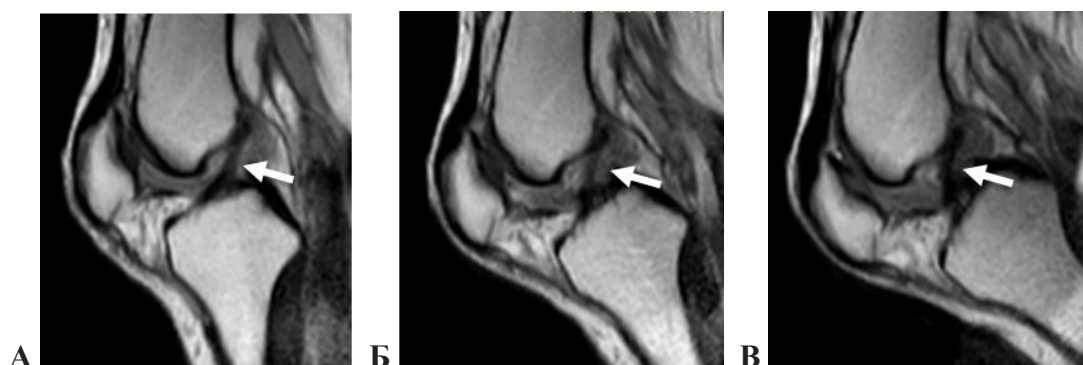


Рисунок 4 – фМРТ. Стрелкой показана ПКС в положении разгибания (А), сгибания на 40° (Б) и сгибания на 60° (В). В норме прослеживается типичное изменение геометрии волокон ПКС в разных положениях сгибания колена

Результаты МРТ и фМРТ у пациентов с подозрением на повреждение ПКС (n = 60, 100%) сравнивали с отчетами артроскопии: артроскопическая диагностика выявила неповрежденную ПКС у 25 пациентов (41,7%), частичные разрывы – в 8 случаях (13,3%), полные разрывы – у 27 пациентов (45%). Распределение пациентов по степени разрыва ПКС для МРТ и фМРТ с артроскопической верификацией суммированы в Таблице 4.

Чувствительность, специфичность, точность и прогностическую ценность обнаружения разрывов ПКС на МРТ и фМРТ рассчитывали отдельно для каждой степени повреждения ПКС, согласно обозначенной в 3-балльной шкале (Таблица 5).

Таблица 4 – 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

Таблица 5 – Чувствительность, специфичность, точность, прогностическая ценность положительного и отрицательного результата МРТ и фМРТ в диагностике разрыва ПКС

Диагноз	МРТ			фМРТ		
	Норма	Частичный разрыв	Полный разрыв	Норма	Частичный разрыв	Полный разрыв
Sn, %	64,00	62,50	59,26	92,00	75,00	92,59
Sp, %	85,71	69,23	93,94	97,14	92,31	96,97
Ac, %	76,67	68,33	78,33	95,00	90,00	95,00
PPV, %	76,19	23,81	88,89	95,83	60,00	96,15
NPV, %	76,92	92,31	73,81	94,44	96,00	94,12

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 (Рисунок 5).

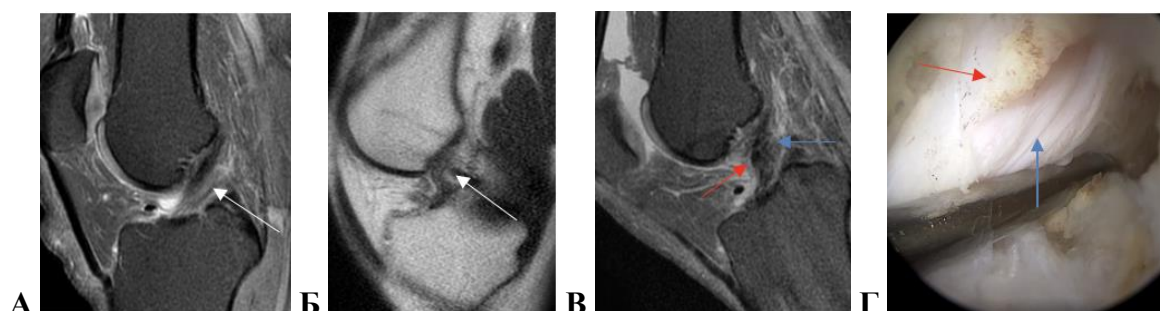


Рисунок 5 – Пациент П., 32 года. Диагноз: подозрение на разрыв ПКС. МРТ (А), фМРТ (Б, В) и артроскопия (Г). Белыми стрелками показана ПКС, красными и синими – ее ПМ и ЗЛ пучки. На МРТ ПКС выглядит неизменной, с нормальным натяжением и структурой, гипоинтенсивным сигналом (А). На фМРТ патологический S-образный изгиб ПКС 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)

После просмотра фМРТ исследователь поставил правильный диагноз в 6 случаях из 7, в которых степень повреждения ПКС была снижена, то есть от частичного разрыва к норме или от полного разрыва к частичному/норме, что впоследствии было подтверждено артроскопически (Рисунок 6).

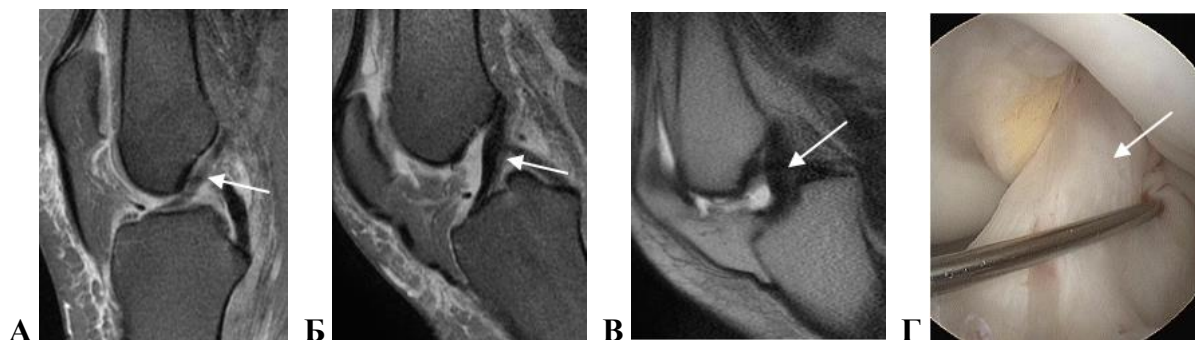


Рисунок 6 – Пациент Д., 30 лет. Диагноз: подозрение на разрыв ПКС. МРТ (А), фМРТ (Б, В) и артроскопия (Г). Стрелками показана ПКС. На МРТ в сагиттальной плоскости (А) ПКС отечна, разволокнена, натяжение ее снижено – частичный разрыв (А). На фМРТ в положении сгибания в режимах PD FS с углом сгибания 30° (Б) и T2 с углом сгибания 50° (В) ПКС имеет хорошее натяжение, однородную структуру с низким МР-сигналом, отмечается ее плавный изгиб кзади, что расценено как нормальная ПКС. Артроскопическая фотография подтверждает неизмененную ПКС (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 7).

Результаты МРТ и фМРТ пациентов с подозрением на повреждение трансплантата ПКС ($n = 38$, 100%) также сравнивали с отчетами артроскопии в качестве эталона: артроскопия выявила неповрежденные трансплантаты ПКС у 17 пациентов (44,7%), частичные разрывы трансплантата – в 6 случаях (15,8%), полные разрывы – у 15 пациентов (39,5%). Распределение пациентов по степени повреждения трансплантата ПКС для МРТ и фМРТ с артроскопической верификацией суммированы в Таблице 6.

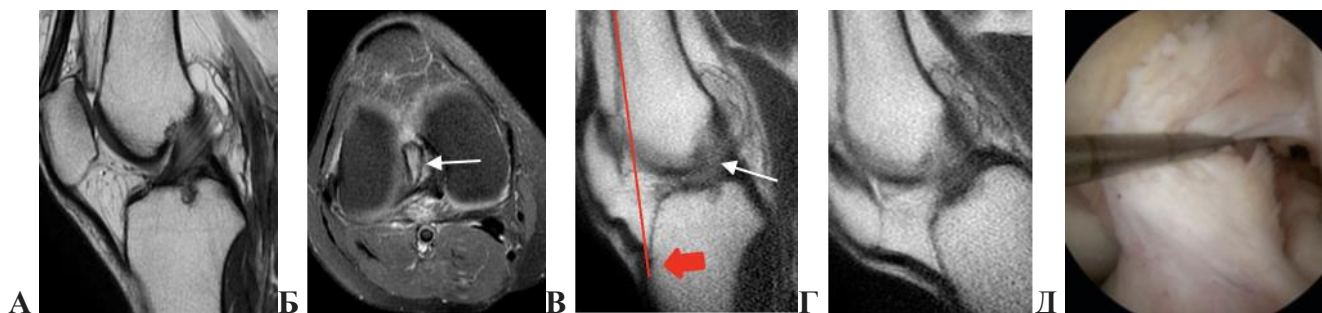


Рисунок 7 – Пациентка К., 33 года. Диагноз: подозрение на разрыв ПКС. МРТ (А, Б), фМРТ (В, Г) и артроскопия (Д). Стрелками показана ПКС. На МРТ в сагиттальной плоскости в режиме T2 (А) и аксиальной плоскости в режиме PD FS (Б) ПКС отечна, утолщена, гиперинтенсивна, натяжение ее снижено – изменения расценены как частичный (интерстициальный) разрыв. На фМРТ в положении разгибания (В) и сгибания на 50° (Г) 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 (Д)

Таблица 6 – 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 трансплантата ПКС: 0 – норма, 1 – частичный разрыв, 2 – полный разрыв. Цифровые значения в таблице – количество пациентов

Чувствительность, специфичность, точность и прогностическую ценность обнаружения разрывов трансплантата ПКС на МРТ и фМРТ рассчитывали отдельно для каждой степени повреждения, согласно обозначенной в 3-балльной шкале (Таблица 7).

Таблица 7 – Чувствительность, специфичность, точность, прогностичность положительного и отрицательного результата МРТ и фМРТ в диагностике разрыва трансплантата ПКС

Диагноз	МРТ			фМРТ		
	Норма	Частичный разрыв	Полный разрыв	Норма	Частичный разрыв	Полный разрыв
Sn, %	64,71	50,0	66,67	94,12	83,33	93,33
Sp, %	80,95	78,13	86,96	95,24	93,75	100,0
Ac, %	73,68	73,68	78,95	94,74	92,11	97,37
PPV, %	73,33	30,00	76,92	94,12	71,43	100,00
NPV, %	73,91	89,29	80,00	95,24	96,77	95,83

После просмотра фМРТ исследователь 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

Диагностическое согласие между МРТ и артроскопией для повреждения ПКС и трансплантата ПКС было идентичным с «умеренным» взвешенным значением $k = 0,430$. В то же время, диагностическое согласие между фМРТ и артроскопией было «отличным» со взвешенными значениями $k = 0,838$ для повреждения ПКС и $k = 0,874$ для повреждения трансплантата ПКС. Уровни достоверности диагностики повреждения ПКС и трансплантата ПКС для МРТ и фМРТ указаны в Таблице 8.

Таблица 8 – Уровни достоверности диагностики МРТ и фМРТ

Диагноз	Метод исследования	Пациенты с подозрением на повреждение ПКС		Пациенты с подозрением на повреждение трансплантата ПКС	
		Количество пациентов	Средний уровень достоверности	Количество пациентов	Средний уровень достоверности
Верный	МРТ	37	3,86	24	3,63
	фМРТ	54	4,5	35	4,60
Ошибочный	МРТ	23	3,09	14	2,86
	фМРТ	6	2,67	3	2,66

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

На Рисунке 10 представлены характеристические кривые точности диагностики каждой степени повреждения ПКС для методов МРТ и фМРТ.

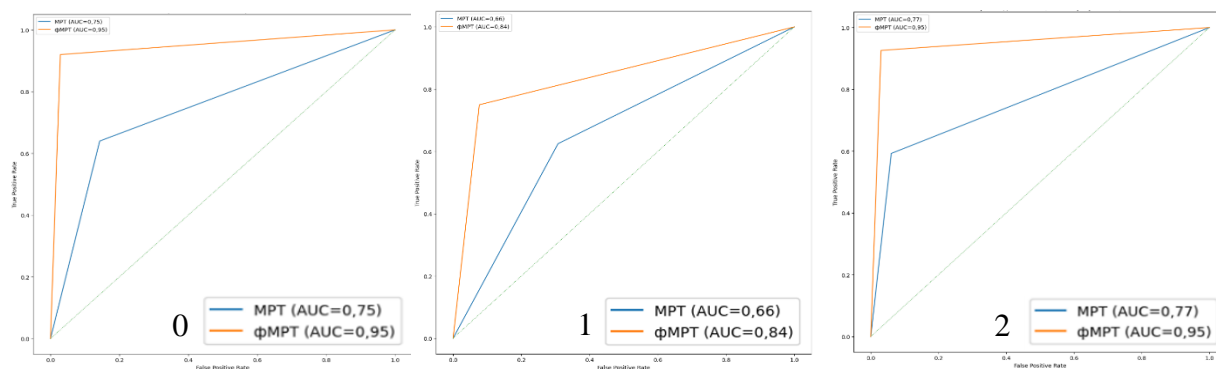


Рисунок 10 – ROC-кривые точности диагностики степени повреждения ПКС для МРТ и фМРТ (0 – норма, 1 – частичный разрыв, 2 – полный разрыв)

Таким образом, фМРТ продемонстрировала более высокие показатели для всех степеней повреждения ПКС по сравнению с МРТ (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.

На Рисунке 11 представлены характеристические кривые точности диагностики каждой степени повреждения трансплантата ПКС для методов МРТ и фМРТ.

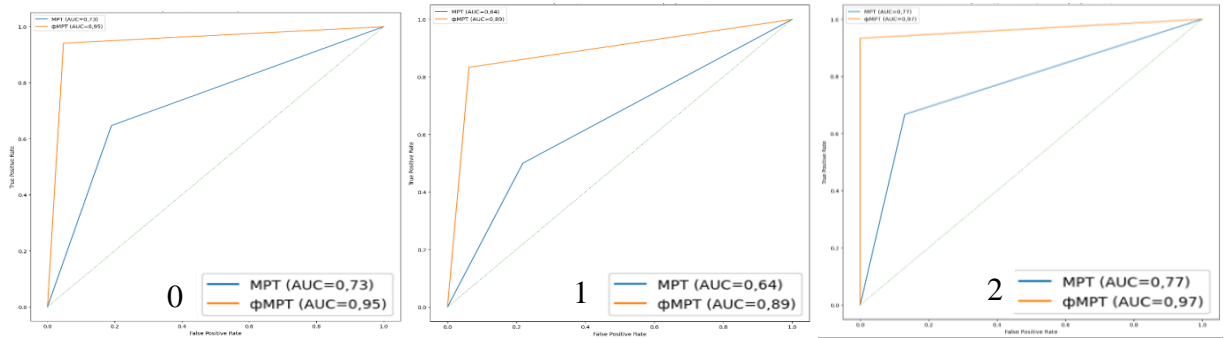


Рисунок 11 – ROC-кривые точности диагностики степени повреждения трансплантата ПКС для МРТ и фМРТ (0 – норма, 1 – частичный разрыв, 2 – полный разрыв)

Таким образом, фМРТ продемонстрировала более высокие показатели для всех степеней повреждения трансплантата ПКС по сравнению с МРТ (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.

Результаты проведенного исследования доказали высокую диагностическую эффективность и прогностическую ценность фМРТ при выявлении повреждений ПКС и трансплантата ПКС, что стало возможным благодаря изученным и разработанным дополнительным признакам, указывающим на нормальную анатомию и функцию ПКС в различные фазы двигательного цикла до и после пластики, а также дополнительным признакам, указывающим на повреждение при фМРТ, которые обобщены в Таблице 9.

Таблица 9 – Дополнительные МР-признаки нормы и разрыва ПКС или трансплантата при проведении фМРТ

МР-признаки	Норма	Разрыв
Анатомия и целостность ПКС или трансплантата	Прослеживается на всем протяжении, непрерывный ход волокон, нет дефектов при сгибании и разгибании сустава	Появление дефектов, нарушение непрерывности хода волокон в любую фазу двигательного цикла
Изометрическая функция двух пучков ПКС или трансплантата	Сохранение натяжения ПКС или трансплантата во все фазы двигательного цикла. При сгибании активен ПМ пучок, а ЗЛ – расслаблен. При разгибании ЗЛ пучок натягивается, а ПМ – расслабляется	Нет непрерывного натяжения в движении, снижение натяжения, дефекты или изменение хода волокон одного из пучков или порций волокон. Примечание: при атипичном положении костных каналов может быть отсутствие натяжения трансплантата без признаков разрыва

Продолжение Таблицы 9

МР-признаки	Норма	Разрыв
Геометрия ПКС и трансплантата в движении	Физиологические изгибы кзади при разгибании и кпереди при сгибании. В отличие от ПКС изгибы трансплантата менее выражены. Примечание: при анатомической пластике ПКС геометрия волокон трансплантата должна быть идентична нативной ПКС	При сгибании не меняет своего положения, S-образная, неправильная форма при сгибании (часто при разрыве ЗЛ пучка), нарушение плавности смены положения ПКС или трансплантата в движении, несоответствие ориентации волокон 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 сустава в положение разгибания – типично для полного разрыва. Примечание: при атипичном положении костных каналов может быть переднезадняя нестабильность без разрыва трансплантата

Результаты данного научного исследования позволяют усовершенствовать текущий клинико-диагностический алгоритм и включить в него фМРТ для более эффективной оценки степени повреждения ПКС или трансплантата, особенно при неоднозначной клинической или инструментальной картине.

Предложенный клинико-диагностический алгоритм обследования пациентов с подозрением на повреждение ПКС или трансплантата ПКС коленного сустава (Рисунок 12) с учетом возможностей фМРТ сокращает количество диагностических ошибок и позволяет выбрать оптимальную стратегию лечения.

Исходя из представленного алгоритма, 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 стандартной МРТ, а также при предполагаемом диагнозе «частичный разрыв» по данным стандартного МРТ. Это связано с верифицированной в ходе исследования более высокой диагностической эффективностью 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. В ходе проведения данной научно-исследовательской работы с включением фМРТ в алгоритм

клинико-лучевого обследования были скорректированы объем и вид планируемой артроскопической операции у 28,6% пациентов (n = 28).

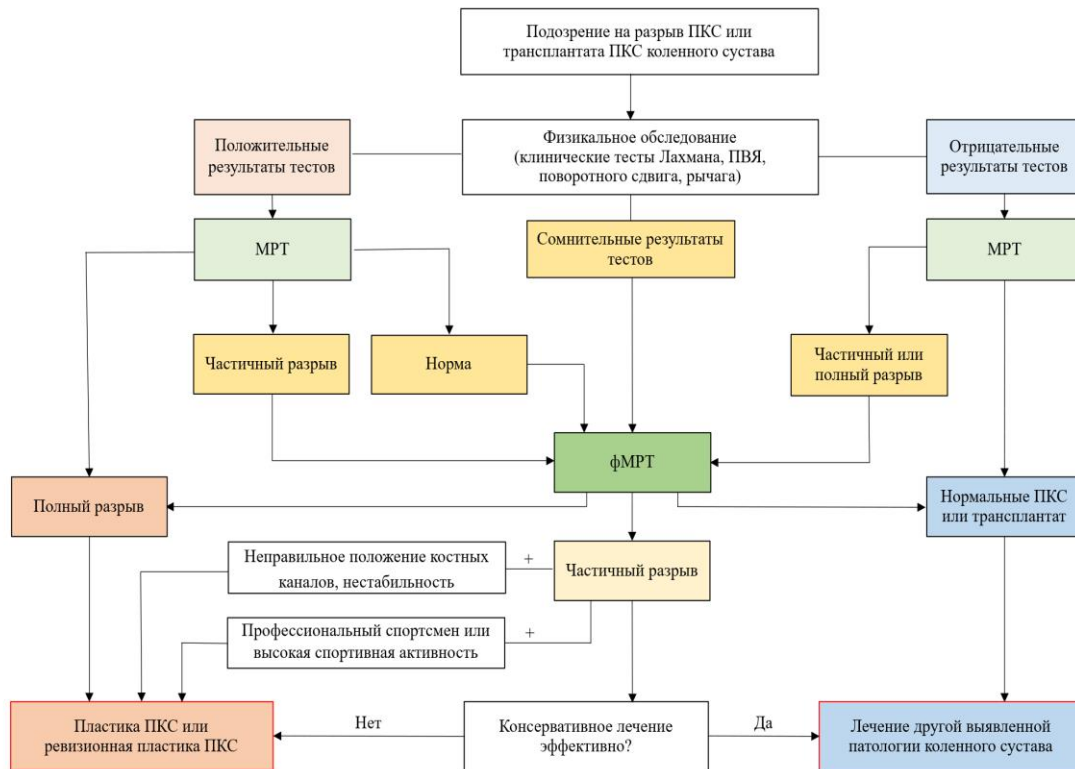


Рисунок 12 – Клинико-диагностический алгоритм обследования пациентов с подозрением на повреждение ПКС или трансплантата ПКС коленного сустава

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 РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. 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. doi: 10.21569/2222-7415-2024-14-4-167-178 [**Scopus**].

2. **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.

3. 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. doi: 10.21569/2222-7415-2025-15-3-221-231 [**Scopus**]

4. 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. doi: 10.52341/20738080-2025-138-5-58

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

ЗЛ – заднелатеральный

ИП – импульсная последовательность

МР – магнитно-резонансный

МРТ – магнитно-резонансная томография

ПКС – передняя крестообразная связка

ПМ – переднемедиальный

фМРТ – функциональная магнитно-резонансная томография

Ac – точность

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

FS, Fat Sat – Fat Saturation, жироподавление

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

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

NPV – прогностическая ценность отрицательного результата

PD – Proton Density, протонная плотность

PPV – прогностическая ценность положительного результата

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

TFE – Turbo Field Echo, турбо-градиентное 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