

ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ МАГНИТНО-РЕЗОНАНСНАЯ ТОМОГРАФИЯ В ДИАГНОСТИКЕ ПОВРЕЖДЕНИЙ ТРАНСПЛАНТАТА ПЕРЕДНЕЙ КРЕСТООБРАЗНОЙ СВЯЗКИ КОЛЕННОГО СУСТАВА

Филистеев П.А.^{1,2,3}, Семенов А.И.¹, Заров А.Ю.¹, Кондрашин С.А.³,
Серова Н.С.³, Терновой С.К.^{3,4}

1 – АНО Центральная клиническая больница Святителя Алексия. г. Москва, Россия.

2 – ФГБУ «ЦКБ с поликлиникой» Управления делами Президента РФ. г. Москва, Россия.

3 – ФГАОУ ВО Первый МГМУ им. И.М. Сеченова МЗ РФ (Сеченовский Университет). г. Москва, Россия.

4 – ФГБУ «Национальный медицинский исследовательский центр кардиологии им. академика Е.И. Чазова» МЗ РФ.
г. Москва, Россия.

Цель исследования. Оценить чувствительность, специфичность, точность и достоверность функциональной магнитно-резонансной томографии (фМРТ) в диагностике повреждений трансплантата передней крестообразной связки коленного сустава. **Материалы и методы.** Обследованы 38 пациентов с подозрением на разрыв трансплантата передней крестообразной (ПКС) связки коленного сустава. Всем пациентам выполнена МРТ по классической методике, фМРТ и артроскопия.

МРТ включала стандартные ортогональные аксиальные, сагиттальные, коронарные изображения, а также косые сагиттальные и коронарные T2-взвешенные изображения по ходу трансплантата ПКС. фМРТ проводилась по разработанной нами методике. Степень повреждения трансплантата передней крестообразной связки на всех МР-изображениях определяли по 3-балльной классификации, где 0 – нормальный трансплантат, 1 – частичный разрыв, 2 – полный разрыв. Полученные результаты сравнивались с результатами артроскопии.

Результаты. фМРТ в диагностике повреждений трансплантата ПКС по сравнению с МРТ показала повышение чувствительности на 29,4% для интактного трансплантата, на 33,3% – для частичного разрыва, на 26,6% – для полного разрыва, повышение специфичности на 14,2% для интактного трансплантата, на 15,7% – для частичного разрыва, на 13,0% – для полного разрыва и точности на 21,0%, 18,4% и 18,4% соответственно.

Средние уровни достоверности правильного диагноза для фМРТ были значительно выше, чем для МРТ ($p < 0,01$).

Диагностическое согласие между МРТ и артроскопией было $k=0,430$. Выполнение фМРТ позволило значимо увеличить диагностическое согласие с артроскопией до $k = 0,874$.

Обсуждение. фМРТ по разработанной методике повышает точность диагностики повреждений трансплантата ПКС, позволяет визуализировать причины ограничения движений в суставе или нестабильности. Выявленные нами новые признаки разрыва трансплантата передней крестообразной связки на фМРТ могут быть использованы при проведении аналогичных функциональных исследований коленного сустава.

Заключение. фМРТ показала более высокую чувствительность, специфичность и точность, чем МРТ для каждой измеряемой степени повреждения трансплантата ПКС. фМРТ по сравнению с МРТ значимо увеличивает диагностическое согласие с артроскопией и повышает достоверность правильного диагноза при оценке ауто трансплантата ПКС.

Ключевые слова: фМРТ, нестабильность коленного сустава, ПКС, трансплантат ПКС, разрыв ауто трансплантата ПКС, частичный разрыв ауто трансплантата ПКС, полный разрыв ауто трансплантата ПКС, коленный сустав, передняя крестообразная связка.

Контактный автор: Филистеев П.А., e-mail: pavel.filisteev@mail.ru

Для цитирования: Филистеев П.А., Семенов А.И., Заров А.Ю., Кондрашин С.А., Серова Н.С., Терновой С.К. Функциональная магнитно-резонансная томография в диагностике

Статья получена: 13.09.25

Статья принята: 30.10.25

FUNCTIONAL MAGNETIC RESONANCE IMAGING IN THE DIAGNOSIS OF ANTERIOR CRUCIATE LIGAMENT GRAFT INJURIES OF THE KNEE JOINT

Filisteev P.A.^{1,2,3}, Semenov A.I.¹, Zarov A.Y.¹, Kondrashin S.A.³, Serova N.S.³, Ternovoy S.K.^{3,4}

1 - St. Alexius Hospital. Moscow, Russia.

2 - Central Clinical Hospital. Moscow, Russia

3 - Sechenov University. Moscow, Russia.

4 - National Cardiology Research Center. Moscow, Russia.

Purpose. To evaluate the diagnostic performance of functional magnetic resonance imaging (fMRI) in detecting anterior cruciate ligament (ACL) graft injuries of the knee.

Materials and methods. Prospectively, 38 consecutive patients with suspected ACL graft injury of the knee underwent standard magnetic resonance imaging (MRI), fMRI, and follow-up arthroscopy.

MRI included standard orthogonal axial, sagittal, coronal images, as well as oblique sagittal and coronal T2-weighted images along the ACL graft. fMRI was carried out according to a method previously developed by us.

The degree of ACL graft damage on all MR images was determined using a 3-point classification, where 0 is a normal graft, 1 is a partial tear, and 2 is a complete tear. The results obtained were compared with the results of arthroscopy.

Results. fMRI in the diagnosis of ACL graft injuries compared with MRI showed an increase in sensitivity by 29,4% for normal ACL graft, by 33,3% for partial tears, by 26,6% for complete tears, an increase in specificity by 14,2% for normal graft, 15,7% for partial tears, 13,0% for full-thickness tears, and an increase in accuracy by 21,0%, 18,4% и 18,4% respectively.

Mean confidence levels for correct diagnosis were significantly higher for fMRI than for MRI ($p < 0.01$).

Diagnostic agreement between MRI and arthroscopy was $k = 0.430$. Performing fMRI significantly increased diagnostic agreement with arthroscopy with values of $k = 0.874$.

Discussion. fMRI using the developed method improves the accuracy of diagnosing ACL graft injuries and makes it possible to differentiate knee laxity and motion restriction reasons. The new fMRI signs of ACL graft rupture that we have identified can be used to conduct similar functional studies of the knee joint.

Conclusion. fMRI showed higher sensitivity, specificity and accuracy than MRI for each grade of ACL graft injury measured. fMRI compared with MRI significantly increases diagnostic agreement with arthroscopy and increases the reliability of the correct diagnosis when assessing the ACL graft.

Keywords: fMRI, knee instability, ACL, ACL graft, ACL graft rupture, partial ACL graft rupture, complete ACL graft rupture, knee joint, anterior cruciate ligament.

Corresponding author: Filisteev P.A., e-mail: pavel.filisteev@mail.ru

For citation: Filisteev P.A., Semenov A.I., Zarov A.Y., Kondrashin S.A., Serova N.S., Ternovoy S.K. Functional magnetic resonance imaging in the diagnosis of anterior cruciate ligament graft injuries of the knee joint. REJR 2025; 15(3):221-231. DOI: 10.21569/2222-7415-2025-15-3-221-231.

Received: 13.09.25

Accepted: 30.10.25

М агнитно-резонансная томография (МРТ) представляет собой ведущий метод неинвазивной дооперационной диагностики разрывов передней крестообразной связки (ПКС) [1]. МРТ также ценна в послеоперационном периоде для оценки состояния трансплантата ПКС, его лигаментизации и инкорпорации, анатомичности его положения. Кроме того, МРТ позволяет оценить потенциальные осложнения и выявить повторную травму [2].

Артроскопия на сегодняшний день остаётся главным диагностическим методом, позволяющим непосредственно визуализировать трансплантат ПКС с высокой точностью [3]. Учитывая стоимость и инвазивный характер артроскопии, разработка нового метода с высокой диагностической эффективностью для оценки повреждения трансплантата передней крестообразной связки остаётся актуальной задачей [4].

Большинство предыдущих МР-исследований были посвящены изучению состояния трансплантата ПКС с использованием ортогональных сагиттальных и коронарных изображений, с применением разной толщины среза и импульсных последовательностей, с акцентом на паттерны МР-сигнала от трансплантата и его анатомию [5].

Некоторые исследователи показали, что дополнительные косые коронарные и сагиттальные срезы могут незначительно повышать точность и достоверность диагностики разрыва трансплантата передней крестообразной связки [6,7,8].

Функциональная МРТ (фМРТ) коленного сустава показала обнадеживающие результаты при визуализации интактной ПКС, с преимуществами в виде оценки биомеханики сустава и непосредственно волокон связки в движении [9].

Целью настоящего исследования было определение диагностической эффективности фМРТ по сравнению со стандартной МРТ коленного сустава в детекции повреждений трансплантата ПКС.

Цель исследования.

Оценить чувствительность, специфичность, точность и достоверность фМРТ в диагностике повреждений трансплантата ПКС коленного сустава.

Материалы и методы.

Проведено МРТ-исследование 38 пациентов после пластики ПКС в возрасте от 18 до 54 лет с повторной травмой коленного сустава с сомнительными или положительными признаками повреждения трансплантата

ПКС по данным клинического осмотра. Из них 57,9% мужчин (n = 22), 42,1% женщин (n = 16). Средний возраст пациентов составил 34,5 года.

Все исследования проводились в АНО ЦКБ святителя Алексия города Москвы на МР-томографе 1,5 Тесла (GE HealthCare, Чикаго, США). Последовательно выполнялась стандартная МРТ коленного сустава и фМРТ. фМРТ выполнялась в положении пациента лежа на животе, ногами вперед, с использованием гибких катушек для суставов, фиксированных вертикально вдоль медиальных и латеральных отделов коленного сустава. Для оценки движения трансплантата ПКС в реальном времени использовали ультрабыстрое одноимпульсное спин-эхо с половинным Фурье-преобразованием (SS-FSE), исследование дополняли псевдодинамическими стандартными последовательностями, взвешенными по протонной плотности с жироподавлением (PD FS) с фиксацией сустава в положении сгибания [9].

После клинического обследования и просмотра МР-изображений пациентам с подозрением на разрыв трансплантата передней крестообразной связки или другое осложнение пластики ПКС проводилась артроскопия.

МР-исследования проводились в среднем через 2 года после пластики ПКС. Средний интервал времени между проведенными МРТ, фМРТ и последующей артроскопией составил 55 дней.

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

Опытный врач-рентгенолог с 15-летним стажем работы делал заключения по результатам МРТ и фМРТ-исследований, первоначально оценивая состояние трансплантата ПКС по данным МРТ коленного сустава, а затем с помощью фМРТ.

Тяжесть повреждения трансплантата ПКС оценивалась по 3-балльной шкале, т. е. оценками 0, 1, 2 [9]. Степень 0 соответствовала нормальному, неповрежденному трансплантату ПКС, степень 1 – частичный разрыв, степень 2 – полный разрыв. Трансплантат ПКС был расценен как нормальный при наличии низкой интенсивности сигнала во всех типах взвешенности, сохранении однородной структуры и достаточного натяжения с типичным ходом волокон. Гиперинтенсивный сигнал на протонно-взвешенных последовательностях, отек, утолщение или истончение, разволокнение, локальная ангуляция трансплантата ПКС при сохранении

целостности расценивались как частичный

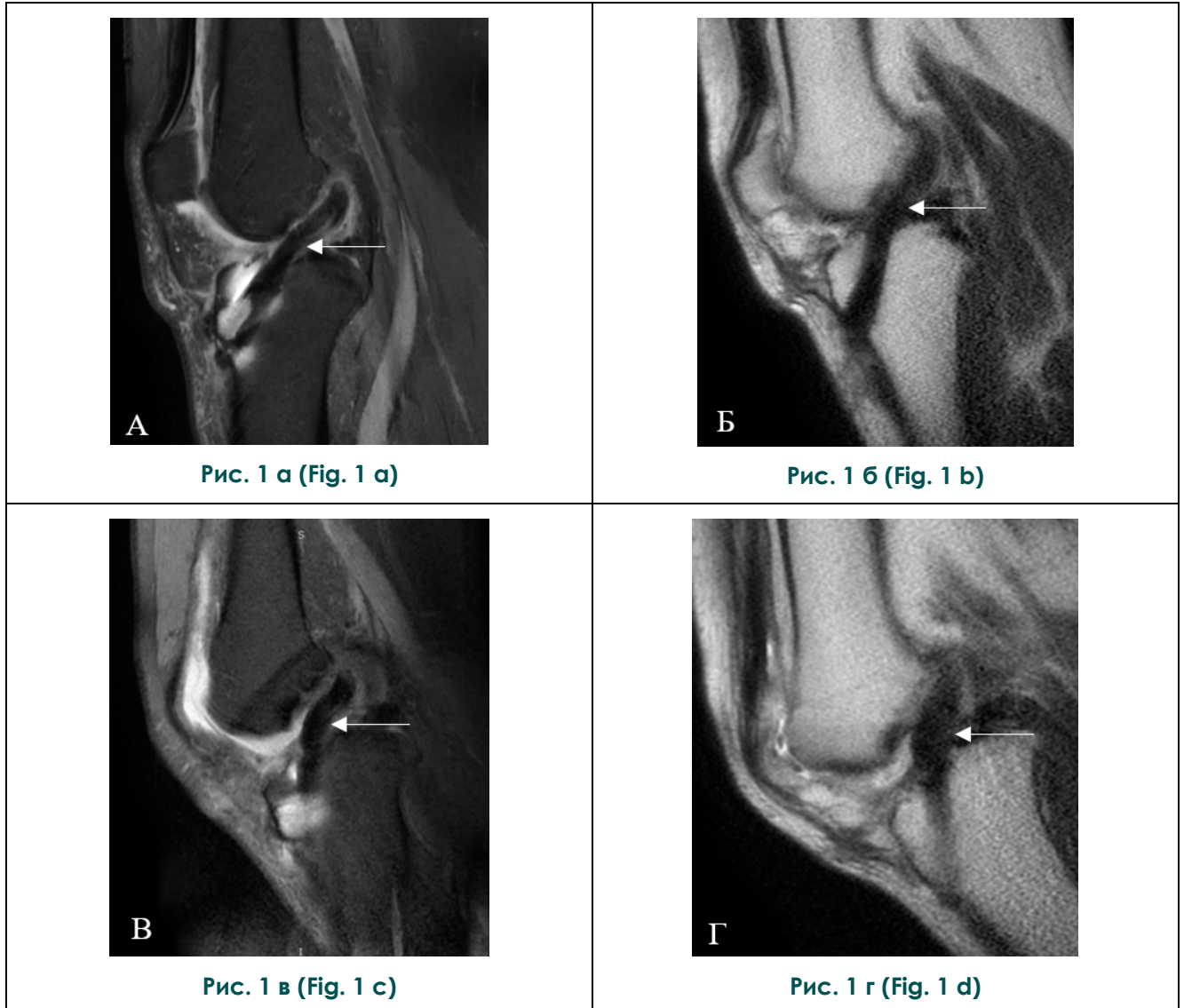


Рис. 1 а (Fig. 1 a)

Рис. 1 б (Fig. 1 b)

Рис. 1 в (Fig. 1 c)

Рис. 1 г (Fig. 1 d)

Рис. 1. фМРТ коленного сустава в кососагиттальной плоскости, ориентированной по трансплантату ПКС, в режимах PD FS и SS-FSE.

Пациент А., 20 лет. Пластика ПКС ауто трансплантатом из сухожилия длинной малоберцовой мышцы 1 год назад. Стрелкой показан неизменный трансплантат ПКС в положении разгибания (А, Б) и сгибания на 50° (Б, В). Отмечается физиологический плавный изгиб волокон трансплантата кпереди при сгибании и практически прямой ход при разгибании.

Fig. 1. Functional MRI of the knee joint in the oblique sagittal plane oriented along the ACL graft in PD FS and SS-FSE modes.

Patient A, 20 years old. Peroneus longus tendon ACL autograft was installed 1 year ago. The arrow shows the unchanged ACL graft in the extension position (A, B) and flexion at 50° (B, C). A physiological smooth bending of the transplant fibers forward during flexion and an almost straight course during extension is noted.

разрыв. Диагноз полного разрыва был выставлен при нарушении непрерывности хода, полнослойных дефектах, аномальном ходе, смещении волокон, его резком удлинении и истончении [10].

При оценке МР-сигнала от трансплантата учитывался срок с момента операции для разграничения «лигаментизации» трансплантата и интерстициального повреждения, особенно в период от 6 до 12 месяцев после пластики ПКС [11].

МР-анатомия интактного трансплантата ПКС на фМРТ в различных положениях

статистики для оценки диагностического согласия между результатами МРТ, фМРТ и артроскопии [11]. Степень согласия интерпретировалась по формуле [12]: 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.

Уровни достоверности интерпретации оценивались для МРТ или фМРТ, а разница в уровнях достоверности проверялась с помощью парного t-критерия.

Чувствительность, специфичность и

Таблица №1. 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.

сгибания и биомеханика сустава в движении соответствовали таковой для нормальной ПКС на фМРТ (рис. 1).

Для трансплантата фМРТ нами были использованы 3 дополнительных признака его повреждения: появление дефектов, нарушение непрерывности хода волокон 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.

Помимо оценки степени повреждения трансплантата ПКС, врач-рентгенолог оценивал уровень 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.

Результаты МРТ сравнивались с отчетами артроскопии в качестве эталонного стандарта для определения состояния трансплантата ПКС.

Статистический анализ проводился с применением взвешенной каппа(k)-

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

Результаты.

Распределение пациентов по степени повреждения трансплантата ПКС для МРТ и фМРТ суммированы в таблице №1. 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 $k = 0,874$.

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)

ву/норме) оказались верными и подтвердились артроскопически (рис. 2).

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 подтвердились артроскопически (рис. 3).

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 подтверждённых диагнозов частичный разрыв).

Уровни достоверности оценки повреждения трансплантата ПКС для МРТ и фМРТ указаны в таблице №2. 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 ($p < 0,01$).

Чувствительность, специфичность и точность МРТ и фМРТ в диагностике разрыва трансплантата были рассчитаны для каждой степени повреждения и указаны в таблице №3.

Чувствительность фМРТ в диагностике разрыва трансплантата ПКС по сравнению с МРТ оказалась выше для каждой степени повреждения (на 29,4% для интактного трансплантата, на 33,3% для частичного разрыва, на 26,6% для полного разрыва), специфичность была также выше на фМРТ (на 14,2% для интактного трансплантата, 15,7% для частичного разрыва, 13,0% для полного разрыва), точность была выше на фМРТ для всех категорий (на 21,0% для нормального трансплантата ПКС, на 18,4% для частичного разрыва, 18,4% для полного разрыва).

Обсуждение.

На сегодняшний день в литературе нет исследований, посвященных биомеханике коленного сустава на МРТ после пластики ПКС.

Имеется несколько статей, где выполнялась фМРТ коленного сустава псевродинамическим способом для оценки анатомии самой ПКС [13] или же проводилась стресс-МРТ с использованием специализированного артрометра для выявления переднего смещения большеберцовой кости при подозрении на разрыв ПКС [14].

Garetier и соавт. в своем обзоре предложили последовательности и протоколы, потенциально подходящие для визуализации

связок коленного сустава в реальном времени, однако не проводили фМРТ-исследования на пациентах с подозрением на повреждение ПКС или трансплантата [15].

В нашем исследовании мы провели фМРТ коленного сустава после пластики ПКС по разработанной нами методике [9], что привело к повышению чувствительности, специфичности и точности диагностики повреждения трансплантата передней крестообразной связки.

Сложности в послеоперационной МРТ-диагностике повреждений трансплантата ПКС связаны с несколькими причинами. С одной стороны, врач-рентгенолог должен знать нормальную анатомию костных каналов и особенностей пластики ПКС, с другой – дифференцировать осложнения пластики (артрофиброз, миграция интерференц-шурупа, импинджмент/нестабильность трансплантата из-за неправильного положения каналов) от непосредственного повреждения трансплантата ПКС [16,17]. Нередко получение послеоперационных МР-изображений сопряжено с артефактами от фиксирующих элементов, дополнительно затрудняющих интерпретацию в одной фиксированной позиции коленного сустава.

Возможность визуализации центральных отделов сустава в движении, получение полипозиционного МРТ-исследования позволяет лучше оценить состояние самого трансплантата, окружающих тканей, костных каналов в спорных случаях, зафиксировать импинджмент или нестабильность в реальном времени. Из-за этого на фМРТ, по сравнению со стандартной МРТ, чаще и с большей уверенностью происходит правильная трактовка степени повреждения трансплантата ПКС.

Использование фМРТ сокращает количество ошибочных диагнозов частичного разрыва трансплантата ПКС в сторону нормы либо полного разрыва, что влияет на тактику лечения пациента в пользу консервативного лечения или повторной операции.

Повышение точности диагностики разрывов трансплантата ПКС на фМРТ связано со следующими факторами: оценкой анатомии трансплантата в различные фазы двигательного цикла (объем движений в суставе при фМРТ до 55-60°), анализом его траектории движения, детекцией переднезадней нестабильности в коленном суставе.

Используемые нами в ходе исследования и перечисленные в статье новые признаки разрыва трансплантата ПКС на фМРТ могут быть включены в семиотику его повреждения и использоваться при проведении



Рис. 2 а (Fig. 2 a)



Рис. 2 б (Fig. 2 b)



Рис. 2 в (Fig. c)

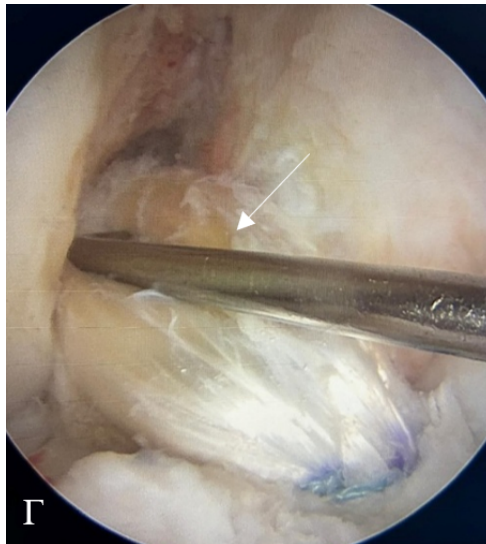


Рис. 2 г (Fig. 2 d)

Рис. 2. А – МРТ, сагиттальная плоскость; Б – фМРТ, режим PD FS; В – фМРТ SS-FSE, режим SS-FSE; Г – артроскопия.

Пациент Д., 31 год. Диагноз: подозрение на частичный разрыв трансплантата ПКС. Стрелками показан трансплантат ПКС. А – Трансплантат ПКС отечен, разволокнен, натяжение ее снижено – изменения расценены как частичный разрыв. Б, В – в положении сгибания и с углом сгибания 45-50° трансплантат ПКС имеет хорошее натяжение, достаточно однородную гипоинтенсивную структуру, отмечается ее физиологический плавный изгиб кзади – признаки нормального трансплантата ПКС на фМРТ. Г – Артроскопическое фото подтверждает нормальный неизмененный аутографт ПКС у пациента.

Fig. 2. А – MRI, sagittal plane; Б – fMRI, PD FS mode; В – fMRI SS-FSE, D – arthroscopy.

Patient D., 31 years old. Diagnosis: suspected patial ACL graft rupture. Arrows indicate the ACL. A – the ACL graft is swollen, dislocated, its tension is reduced – the changes are regarded as a partial rupture. B, C – in the flexion position and with a flexion angle of 45-50° the ACL graft has good tension, a relatively homogeneous hypointense structure, its physiological smooth posterior bending is noted – signs of a normal ACL graft on fMRI. D – an arthroscopic photograph confirmed normal, intact autograft in this patient.



Рис. 3 а (Fig. 3 a)



Рис. 3 б (Fig. 3 b)

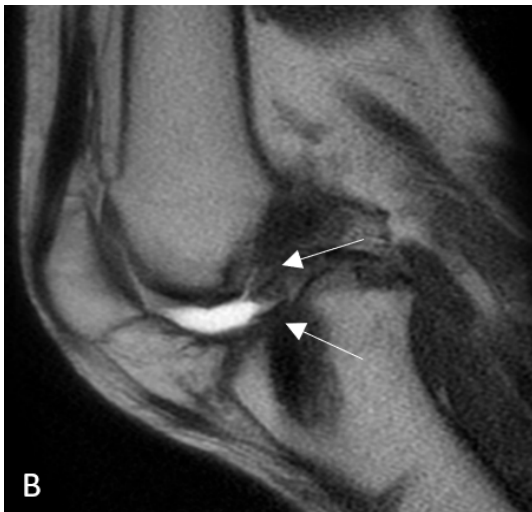


Рис. 3 в (Fig. 3 c)

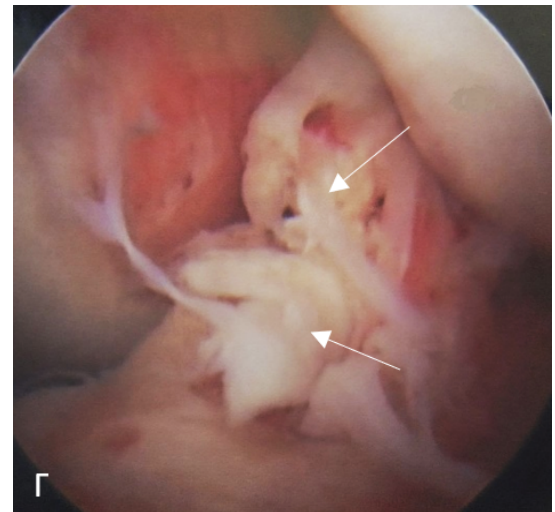


Рис. 3 г (Fig. 3 d)

Рис. 3. А – МРТ, сагиттальная плоскость; Б – фМРТ, режим PD FS; В – фМРТ, режим SS-FSE; Г – артроскопия.

Пациентка М., 26 лет. Диагноз: подозрение на разрыв трансплантата ПКС. Стрелками показан трансплантат ПКС. А – трансплантат ПКС в режиме PD FS неоднородной структуры за счет участков повышения МР-сигнала, умеренно истончен, прослеживается 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. Г – Артроскопическое фото подтверждает полный разрыв трансплантата ПКС с формированием культей.

Fig. 3. А – MRI, sagittal plane; В – fMRI, PD FS mode; С – fMRI SS-FSE, D – arthroscopy.

Patient M., 26 years old. Diagnosis: suspected ACL graft rupture. Arrows indicate the ACL graft.

A – in PD FS mode the ACL graft has a heterogeneous structure due to areas of increased MR signal, is moderately thinned, can be seen along its entire length – the changes are regarded as a partial rupture. On fMRI in the flexion position in the PD FS (B) and SS-FSE (C) modes with a flexion angle of 45-50° the ACL the changes are interpreted as a complete rupture of the ACL graft in central portion with proximal and distal stumps formation. D – an arthroscopic photo confirms a complete rupture of the ACL garft with the formation of stumps.

Таблица №2. 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	2,88
	фМРТ	3	2,72

Примечание. *Средний уровень достоверности рассчитывался в диапазоне 1-5, где 5 – очень вероятно

Таблица №3. Чувствительность, специфичность и точность МРТ и фМРТ в диагностике повреждения трансплантата ПКС.

Диагноз	МРТ			фМРТ		
	Чувствительность, %	Специфичность, %	Точность, %	Чувствительность, %	Специфичность, %	Точность, %
Норма	64,7	81,0	73,7	94,1	95,2	94,7
Частичный разрыв	50,0	78,1	73,7	83,3	93,8	92,1
Полный разрыв	66,6	87,0	79,0	93,3	100,0	97,3

аналогичных функциональных исследований коленного сустава.

Следует упомянуть ограничения настоящего исследования. Во-первых, в нашем исследовании не учитывались особенности различных видов аутотрансплантатов ПКС и типов фиксации. Во-вторых, в исследовании не всегда выдерживался временной интервал между МРТ/фМРТ и артроскопией. В-третьих, пациенты, попавшие в нашу выборку, в большинстве своем имели сомнительные результаты клинических тестов в отношении разрыва трансплантата ПКС и относились к клинически сложным случаям, что могло повлиять на относительно низкие показатели точности для стандартного МР-исследования.

Заключение.

Функциональная магнитно-резонансная томография коленного сустава повышает точность диагностики и достоверность оценки повреждения трансплантата передней крестообразной связки.

фМРТ в диагностике повреждений трансплантата ПКС по сравнению с МРТ показала повышение чувствительности на 29,4% для интактного трансплантата, на 33,3% – для частичного разрыва, на 26,6% – для полного разрыва, повышение специфичности на 14,2% – для интактного трансплантата, на 15,7% – для частичного разрыва, на 13,0% – для полного разрыва и точности на 21,0%, 18,4% и 18,4% соответственно.

Средние уровни достоверности правильного диагноза для фМРТ были значительно выше, чем для МРТ ($p < 0,01$).

фМРТ ($k=0,874$) по сравнению с МРТ ($k=0,430$) значительно увеличивает диагностическое согласие с артроскопией и повышает достоверность правильного диагноза при оценке трансплантата ПКС.

Источник финансирования и конфликт интересов.

Авторы данной статьи подтвердили отсутствие финансовой поддержки исследования и конфликта интересов, о которых необходимо сообщить.

Список литературы:

1. Zhao M, Zhou Y, Chang J, Hu J, Liu H, Wang S, Si D, Yuan Y, Li H. The accuracy of MRI in the diagnosis of anterior cruciate ligament injury. *Ann Transl Med.* 2020 Dec;8(24):1657. doi: 10.21037/atm-20-7391. PMID: 33490169; PMCID: PMC7812197.
2. Kulczycka P, Larbi A, Malghem J, Thienpont E, Vande Berg B, Lecouvet F. Imaging ACL reconstructions and their complications. *Diagn Interv Imaging.* 2015 Jan;96(1):11-9. doi: 10.1016/j.diii.2014.04.007. Epub 2014 Jun 6. PMID: 24910463.
3. Roßbach BP, Pietschmann MF, Gülecüyz MF, Niethammer TR, Ficklscherer A, Wild S, Jansson V, Müller PE. Indications requiring preoperative magnetic resonance imaging before knee arthroscopy. *Arch Med Sci.* 2014 Dec 22;10(6):1147-52. doi: 10.5114/aoms.2014.47825. PMID: 25624852; PMCID: PMC4296071.
4. Swain MS, Henschke N, Kamper SJ, Downie AS, Koes BW, Maher CG. Accuracy of clinical tests in the diagnosis of anterior cruciate ligament injury: a systematic review. *Chiropr Man Therap.* 2014 Aug 1;22:25. doi: 10.1186/s12998-014-0025-8. PMID: 25187877; PMCID: PMC4152763.
5. Grassi A, Bailey JR, Signorelli C, Carbone G, Tchonang Wakam A, Lucidi GA, Zaffagnini S. Magnetic resonance imaging after anterior cruciate ligament reconstruction: A practical guide. *World J Orthop.* 2016 Oct 18;7(10):638-649. doi: 10.5312/wjo.v7.i10.638. PMID: 27795945; PMCID: PMC5065670.
6. ElSayed M, Rashwan AS, Kamal H. Use of oblique sagittal and coronal weighted images for diagnosis and grading of ACL graft injury. *Egypt J Radiol Nucl Med.* 2022;53(1):121. doi: 10.1186/s43055-022-00790-4. Epub 2022 May 24. PMCID: PMC9127290.
7. Kim SI, Park HJ, Lee SY, Chung EC, Kwon HJ, Cha JG, Kim S. Usefulness of oblique coronal and sagittal MR images of the knee after double-bundle and selective anterior cruciate ligament reconstructions. *Acta Radiol.* 2015 Mar;56(3):312-21. doi: 10.1177/0284185114525952. Epub 2014 Mar 3. PMID: 24589443.
8. Серова Н.С., Бабкова А.А., Терновой С.К. Функциональная мультиспиральная компьютерная томография (фМСКТ) в диагностике патологий пателлофemorального сочленения. *REJR.* 2025; 15(1):130-138. DOI: 10.21569/2222-7415-2025-15-1-130-138.
9. Филистеев П.А., Терновой С.К., Серова Н.С., Семенов А.И., Заров А.Ю. Функциональная магнитно-резонансная томография в оценке биомеханики передней крестообразной связки коленного сустава: методика и протокол исследования. *REJR.* 2024; 14(4):167-178. DOI: 10.21569/2222-7415-2024-14-4-167-178.
10. Stoller D.W. *Magnetic resonance imaging in orthopedics and sports medicine.* 3rd ed. Philadelphia, Lippincott Williams & Wilkins, 2007.
11. Yau WP, Chan YC. Evaluation of Graft Ligamentization by MRI After Anterior Cruciate Ligament Reconstruction. *Am J Sports Med.* 2023 May;51(6):1466-1479. doi: 10.1177/03635465231160790. Epub 2023 Apr 4. PMID: 37014301.
12. Soo A. *Measuring Observer Agreement on Categorical Data (Doctoral thesis, University of Calgary, Calgary, Canada),* 2015. Available at: <https://prism.ucalgary.ca>. doi:10.11575/PRISM/26858
13. Guenoun D, Vaccaro J, Le Corroller T, Barral PA, Lagier A, Pauly V, Coquart B, Coste J, Champsaur P. A dynamic study of the anterior cruciate ligament of the knee using an open MRI. *Surg Radiol Anat.* 2017 Mar;39(3):307-314. doi: 10.1007/s00276-016-1730-x. Epub 2016 Aug 11. PMID: 27515305.
14. Klon W, Domzalski M, Malinowski K, Sadlik B. Translation and rotation analysis based on stress MRI for the diagnosis of anterior cruciate ligament tears. *Quant Imaging Med Surg.* 2022 Jan;12(1):257-268. doi: 10.21037/qims-21-153. PMID: 34993076; PMCID: PMC8666731.
15. Garetier M, Borotikar B, Makki K, Brochard S, Rousseau F, Ben Salem D. Dynamic MRI for articulating joint evaluation on 1.5 T and 3.0 T scanners: setup, protocols, and real-time sequences. *Insights Imaging.* 2020 May 19;11(1):66. doi: 10.1186/s13244-020-00868-5. PMID: 32430739; PMCID: PMC7237553.
16. Velicheti S., Ramadugu A., Chalasani K., Kotagiri R., Padavala S. *J Glob Radiol.* 2022; 8 (1): 1151 DOI: 10.7191/jgr.2022.1151
17. Eevir Akram Zain Aladdin, Saad Kadhum Kareem, Niran Mahmood, Ahmed Al Tameemi. Radiological assessment of age from the epiphyseal fusion of the knee joint. *REJR.* 2023; 13(3):83-96. DOI: 10.21569/2222-7415-2023-13-3-83-96.

References:

1. Zhao M, Zhou Y, Chang J, Hu J, Liu H, Wang S, Si D, Yuan Y, Li H. The accuracy of MRI in the diagnosis of anterior cruciate ligament injury. *Ann Transl Med.* 2020 Dec;8(24):1657. doi: 10.21037/atm-20-7391. PMID: 33490169; PMCID: PMC7812197.
2. Kulczycka P, Larbi A, Malghem J, Thienpont E, Vande Berg B, Lecouvet F. Imaging ACL reconstructions and their complications. *Diagn Interv Imaging.* 2015 Jan;96(1):11-9. doi: 10.1016/j.diii.2014.04.007. Epub 2014 Jun 6. PMID: 24910463.
3. Roßbach BP, Pietschmann MF, Gülecüyz MF, Niethammer TR, Ficklscherer A, Wild S, Jansson V, Müller PE. Indications requiring preoperative magnetic resonance imaging before knee arthroscopy. *Arch Med Sci.* 2014 Dec 22;10(6):1147-52. doi: 10.5114/aoms.2014.47825. PMID: 25624852; PMCID: PMC4296071.
4. Swain MS, Henschke N, Kamper SJ, Downie AS, Koes BW, Maher CG. Accuracy of clinical tests in the diagnosis of anterior cruciate ligament injury: a systematic review. *Chiropr Man Therap.* 2014 Aug 1;22:25. doi: 10.1186/s12998-014-0025-8. PMID: 25187877; PMCID: PMC4152763.
5. Grassi A, Bailey JR, Signorelli C, Carbone G, Tchonang

- Wakam A, Lucidi GA, Zaffagnini S. Magnetic resonance imaging after anterior cruciate ligament reconstruction: A practical guide. *World J Orthop.* 2016 Oct 18;7(10):638-649. doi: 10.5312/wjo.v7.i10.638. PMID: 27795945; PMCID: PMC5065670.
6. ElSayed M, Rashwan AS, Kamal H. Use of oblique sagittal and coronal weighted images for diagnosis and grading of ACL graft injury. *Egypt J Radiol Nucl Med.* 2022;53(1):121. doi: 10.1186/s43055-022-00790-4. Epub 2022 May 24. PMCID: PMC9127290.
7. Kim SI, Park HJ, Lee SY, Chung EC, Kwon HJ, Cha JG, Kim S. Usefulness of oblique coronal and sagittal MR images of the knee after double-bundle and selective anterior cruciate ligament reconstructions. *Acta Radiol.* 2015 Mar;56(3):312-21. doi: 10.1177/0284185114525952. Epub 2014 Mar 3. PMID: 24589443.
8. Serova N.S., Babkova A.A., Ternovoy S.K. Application of functional multispiral computed tomography (fMSCT) in the diagnosis of pathologies of the patellofemoral joint. *REJR* 2025; 15(1):130-138. DOI: 10.21569/2222-7415-2025-15-1-130-138 (in Russian).
9. Filisteev P.A., Ternovoy S.K., Serova N.S., Semenov A.I., Zarov A.Y. Functional magnetic resonance imaging in assessing the biomechanics of the anterior cruciate ligament of the knee joint: methodology and study protocol. *REJR* 2024; 14(4):167-178. DOI: 10.21569/2222-7415-2024-14-4-167-178 (in Russian).
10. Stoller D.W. *Magnetic resonance imaging in orthopedics and sports medicine.* 3rd ed. Philadelphia, Lippincott Williams & Wilkins, 2007.
11. Yau WP, Chan YC. Evaluation of Graft Ligamentization by MRI After Anterior Cruciate Ligament Reconstruction. *Am J Sports Med.* 2023 May;51(6):1466-1479. doi: 10.1177/03635465231160790. Epub 2023 Apr 4. PMID: 37014301.
12. Soo A. *Measuring Observer Agreement on Categorical Data (Doctoral thesis, University of Calgary, Calgary, Canada),* 2015. Available at: <https://prism.ucalgary.ca>. doi:10.11575/PRISM/26858
13. Guenoun D, Vaccaro J, Le Corroller T, Barral PA, Lagier A, Pauly V, Coquart B, Coste J, Champsaur P. A dynamic study of the anterior cruciate ligament of the knee using an open MRI. *Surg Radiol Anat.* 2017 Mar;39(3):307-314. doi: 10.1007/s00276-016-1730-x. Epub 2016 Aug 11. PMID: 27515305.
14. Klon W, Domżalski M, Malinowski K, Sadlik B. Translation and rotation analysis based on stress MRI for the diagnosis of anterior cruciate ligament tears. *Quant Imaging Med Surg.* 2022 Jan;12(1):257-268. doi: 10.21037/qims-21-153. PMID: 34993076; PMCID: PMC8666731.
15. Garetier M, Borotikar B, Makki K, Brochard S, Rousseau F, Ben Salem D. Dynamic MRI for articulating joint evaluation on 1.5 T and 3.0 T scanners: setup, protocols, and real-time sequences. *Insights Imaging.* 2020 May 19;11(1):66. doi: 10.1186/s13244-020-00868-5. PMID: 32430739; PMCID: PMC7237553.
16. Velicheti S., Ramadugu A., Chalasani K., Kotagiri R., Padavala S. *J Glob Radiol.* 2022; 8 (1): 1151 DOI: 10.7191/jgr.2022.1151
17. Eevir Akram Zain Aladdin, Saad Kadhum Kareem, Niran Mahmood, Ahmed Al Tameemi. Radiological assessment of age from the epiphyseal fusion of the knee joint. *REJR.* 2023; 13(3):83-96. DOI: 10.21569/2222-7415-2023-13-3-83-96.