

УДК

Перестройка трансплантата передней крестообразной связки по данным МРТ

С. Н. Красноперов¹, И. В. Диденко¹, Р. В. Титарчук²,
А. А. Гриценко², М. Л. Головаха¹

¹ Запорожский государственный медицинский университет. Украина

² Клиника «Гарвис», Днепр. Украина

Ушкодження передньої схрещеної зв'язки (ПСЗ) — одна з найчастіших травм зв'язок колінного суглоба. Магнітно-резонансна томографія (МРТ) є важливим методом для оцінювання трансплантата та виявлення ускладнень, пов'язаних із реконструкцією ПСЗ. Мета: розробити МРТ-критерії для оцінювання перебудови трансплантата ПСЗ. Методи: за допомогою МРТ досліджено 95 пацієнтів через 3, 6, 9 і 12 міс. після відновлення ПСЗ. Ремодельовання трансплантата ПСЗ оцінювали за інтенсивністю МРТ-сигналу в T2 та зважених за протонною щільністю послідовностях (PDW), а також за ступенем його однорідності, використовуючи трибальну шкалу. Для виключення суб'єктивності аналізу МРТ-картини застосовували коефіцієнт сигнал/шум. Отримані показники порівняли з величинами інтактної ПСЗ у 50 пацієнтів. Результати: значення коефіцієнта сигнал/шум (КСШ) зменшувалось від 3 до 9 міс. після операції, що свідчить про перебудову трансплантата протягом цього періоду в усіх його частинах (стегновій, серединній і великогомілковій). Між показниками коефіцієнту сигнал/шум, отриманими через 9 та 12 міс. після операції, достовірних відмінностей не виявлено. Зафіксовано, що навіть через 12 міс. після операції інтенсивність сигналу від трансплантата ПСЗ не досягає значень неушкодженої зв'язки. Висновки: запропоновано методику оцінювання динаміки відновлення трансплантата ПСЗ після операції на підставі аналізу МРТ-зображень. Вона передбачає визначення інтенсивності сигналу з використанням коефіцієнта сигнал/шум, а також якісне оцінювання загального виду трансплантата ПСЗ за ступенем його однорідності за трибальною шкалою. Розроблено критерії МРТ-оцінювання перебудови внутрішньосуглобової частини трансплантата ПСЗ. Результати необхідно враховувати під час планування програми реабілітації та розроблення методик, спрямованих на прискорення біологічного remodelювання трансплантата після реконструкції ПСЗ. Ключові слова: передня схрещена зв'язка, трансплантат, МРТ, критерії лігаментизації.

Ключевые слова: передняя крестообразная связка, трансплантат, МРТ, критерии лигаментизации

Введение

Повреждение передней крестообразной связки (ПКС) — одна из самых частых травм связок коленного сустава [4, 10]. Техника реконструкции ПКС претерпела значительные изменения за последние 10 лет, однако частота неудовлетворительных результатов в виде несостоятельности трансплантата остается достаточно высокой — от 5 до 25 % [1, 2, 6, 10, 21]. Результаты реконструкции ПКС во многом зависят от рациональной программы реабилитации для достижения нормальной функции коленного сустава, которая должна учитывать динамику биологических изменений (ремоделирование) трансплантата.

Магнитно-резонансная томография (МРТ) на сегодня является результативным методом исследования в дополнение к клиническому обследованию коленного сустава в послеоперационном периоде. МРТ дает возможность оценить целостность трансплантата, а также выявить осложнения, связанные с реконструкцией ПКС [12, 13, 17, 18, 19].

Необходимо учитывать факторы, влияющие на перестройку трансплантата: 1) вокруг канала в бедренной кости обычно нет мягких тканей; 2) в месте его входа в канал большеберцовой кости всегда остается часть культи; 3) трансплантат в средней части омывается синовиальной жидкостью. Поэтому в различных частях трансплантата ПКС его перестройка проходит неодинаково. Выделяют внутрисуставное ремоделирование, которое в литературе принято называть «лигаментизацией», и интегрирование трансплантата с костью в местах его фиксации — «внутритуннельной инкорпорацией» [7, 9, 14, 16].

Известно, что изначально трансплантат из сухожилий полусухожильной и нежной мышц имеет достаточно высокую прочность, которая составляет минимум 110 % от прочности интактной ПКС. Затем, во время реваскуляризации, она снижается, и через 3 мес. после операции составляет около 40 %. Далее прочность трансплантата постепенно возрастает и достигает своего максимума в период между 7 и 12 мес. после операции — около 80 % от прочности интактной ПКС [5].

Опубликовано несколько работ, в которых оценивали процесс реваскуляризации трансплантата при помощи только гистологического анализа либо в сочетании с интерпретацией МРТ-обследования с использованием контрастных веществ [3, 4, 8–11, 20]. Большинство исследований проведено на животных. Мы нашли

только одну работу, авторы которой оценили изменение структуры трансплантата при помощи МРТ-исследования без контраста. При этом анализировали не количественные изменения сигнала от структуры, а качественные, по классификации интенсивности сигнала — гипер-, гипо- и изоинтенсивный с добавлением подгрупп в виде «умеренно» или «выражено-интенсивный». Такая оценка, на наш взгляд, является субъективной. Авторы заключили, что МРТ-картина структуры трансплантата изменяется до 3 мес. после операции, а затем остается постоянной при сроке наблюдения до года. Однако ими обследовано небольшое количество пациентов — 21 [10].

Цель работы: разработать МРТ-критерии оценки перестройки трансплантата ПКС.

Материал и методы

Выполнение работы одобрено локальным комитетом по биоэтике (комиссия по вопросам биоэтики Запорожского государственного медицинского университета, протокол № 7 от 26.10.2016). От всех пациентов, которые вошли в исследование, получено информированное согласие. Группу наблюдения составили 95 больных (66 мужчин, 29 женщин) после восстановления ПКС. Распределение по возрасту было таким: до 20 лет — 18 человек, от 21 до 30 — 38, от 31 до 40 — 21, старше 40 — 18. Использовали только однопучковую пластику ПКС. У 53 пациентов применяли технику «all-inside», воспользовались трансплантатом только из сухожилия полусухожильной мышцы, у 28 — трансплантатом из сухожилий полусухожильной и нежной мышц, у 14 — из средней трети связки надколенника с костными блоками. МРТ проводили через 3, 6, 9 и 12 мес. после операции. Все пациенты обследованы на аппарате «Philips Intera» с напряженностью магнитного поля 1,5 Тесла. Протокол МРТ-исследования предполагал толщину срезов 3 мм с промежутками 0,5 мм. Динамику ремоделирования трансплантата ПКС оценивали по интенсивности МРТ-сигнала: 1) сагиттальные последовательности, взвешенные по протонной плотности PDW (repetition time (TR) = 3000 ms, echo time (TE) = 30 ms, echo train length = 8,2 number of excitations (NEX), 320/224 matrix); 2) аксиальные T2 последовательности (TR = 4000 ms, TE = 85 ms, echo train length = 12,2 NEX, 256/192 matrix). На них высокая интенсивность сигнала соответствует более светлому цвету трансплантата, низкая — темному.

Для исключения субъективности оценки МРТ-картины специалисты используют коэф-

фициент сигнал/шум, который вычисляется по формуле [22]:

$$\text{КСШ} = \frac{\text{интенсивность сигнала от структуры}}{\text{интенсивность сигнала} - \text{шум}}. \quad (1)$$

При этом интенсивность сигнала измеряется в единицах Хоунсфильда [15]. В нашем исследовании

$$\text{КСШ} = \frac{\text{интенсивность сигнала от трансплантата ПКС}}{\text{интенсивность сигнала от различных фоновых структур коленного сустава}}. \quad (2)$$

Интенсивность сигнала трансплантата ПКС определяли на двух последовательных сагиттальных срезах, взвешенных по протонной плотности (PDW), что увеличивало вероятность истинного измерения. Для определения сигнала использовали окружность диаметром 4 мм в трех локализациях: рядом с каналом большеберцовой кости, в середине трансплантата и около канала бедренной кости (рис. 1).

Кроме того, интенсивность сигнала трансплантата ПКС оценивали на аксиальных T2 срезах, окружностью с диаметром 4 мм на тех же



Рис. 1. МРТ-изображение с измерением интенсивности сигнала в трех точках трансплантата ПКС, средней трети задней крестообразной связки и собственной связки надколенника на PDW последовательности

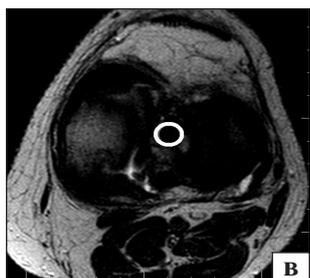


Рис. 2. МРТ-изображения с измерением интенсивности сигнала на аксиальных срезах в T2 от различных частей трансплантата ПКС: а) около бедренного канала; б) в средней части; в) около большеберцового канала

уровнях (рис. 2, а–в). Для измерения фоновой интенсивности сигнала использовали несколько анатомических структур коленного сустава: сухожилие полуперепончатой мышцы (рис. 3), заднюю крестообразную связку в средней трети, собственную связку надколенника в средней трети (рис. 1). На аксиальных последовательностях трансплантат ПКС сравнивали с собственной связкой надколенника в средней трети (рис. 4).

Дополнительно оценивали общий вид трансплантата ПКС по степени его однородности на последовательностях, взвешенных по протонной плотности (PDW). Использовали трехбалльную шкалу, где 3 балла присваивалось полностью гомогенной по структуре связке, 2 — незначительно гетерогенной и 1 — полностью гетерогенной (рис. 5).

В качестве группы сравнения использованы 50 МРТ-исследований пациентов с ретроспективно подтвержденной интактной ПКС. Обследования этой группы проводили по идентичному протоколу.

Статистический анализ результатов выполнен при помощи программных пакетов Microsoft Excel XP и Statsoft Statistica 6.0. Статистическая значимость принята при $p < 0,05$.

Результаты и их обсуждение

Интенсивность сигнала от трансплантата ПКС измерена в различные промежутки времени — 3, 6, 9 и 12 мес. после операции и пластики под артроскопическим контролем (рис. 6).

Средние значения КСШ для исследованных структур в различные сроки наблюдения представлены на рис. 7.

Как видно на диаграммах, значение КСШ для различных фоновых структур коленного сустава постепенно уменьшалось при обследовании в 3, 6 и 9 мес. после операции. Это свидетельствует о перестройке трансплантата во всех его частях (бедренной, срединной и тиббиальной) в этот период времени.



Рис. 3. МРТ-изображение с измерением интенсивности сигнала в средней трети сухожилия полуперепончатой мышцы на PDW последовательности



Рис. 4. МРТ-изображение с измерением интенсивности сигнала от собственной связки надколенника на аксиальных T2 срезах

Сравнивая интенсивность сигнала в 9 и 12 мес., когда фоновыми структурами были задняя крестообразная связка и собственная связка надколенника, мы не обнаружили достоверной разницы ($p > 0,05$) (рис. 7, б, в). В случае, когда фоновой структурой было сухожилие полуперепончатой мышцы, для срединной части трансплантата при обследовании через 9 и 12 мес. после операции отмечено достоверное уменьшение КСШ ($p < 0,05$), что свидетельствует о продолжающемся процессе перестройки.

Хотелось бы отметить тот факт, что величина КСШ в большинстве случаев была достоверно меньше в тибиальной части трансплантата, чем в срединной и проксимальной частях ($p < 0,05$) (соответственно на МРТ сигнал от трансплантата был низко-интенсивным, а цвет темнее). Эта разница сохранялась в течение всего периода наблюдения (рис. 7, 8 и 9).

Также мы проанализировали МРТ 50 пациентов с интактной ПКС. Средние значения КСШ для разных структур и частей интактной ПКС представлены на рис. 8.

Изучая полученные данные можно отметить, что даже через 12 мес. после операции интенсивность сигнала от трансплантата ПКС не достигла показателя неповрежденной связки ($p < 0,05$) (рис. 8, 9). Так, КСШ, когда фоновой точкой было сухожилие полуперепончатой мышцы, через 12 мес. после реконструкции ПКС для тибиальной части составил 2,0; для срединной — 2,5; для бедренной — 2,9; тогда как у пациентов с интактной ПКС эти значения были 1,8; 1,7 и 1,7 соответственно (рис. 7). Отсутствие динамики интенсивности сигнала в промежуток между 9 и 12 мес. с момента операции свидетельствует, что процесс лигаментизации закончился.

Также, при отдельном рассмотрении групп пациентов, у которых использовали сухожилия семи-группы и трансплантат из собственной связки надколенника, мы получили различные результаты. За счет применения трансплантата из сухожилия полусухожильной мышцы или в комбинации с сухожилием нежной мышцы КСШ больше стремился к единице, когда фоновой точкой было сухожилие полуперепончатой мышцы, по сравнению с такими фоновыми структурами: задней крестообразной связкой и собственной связкой надколенника. В группе пациентов, у которых применяли трансплантат из собственной связки надколенника, КСШ приближался к единице, когда фоновой точкой была собственная связка надколенника. Это подтверждает факт, что трансплантат из сухожилий полусухожильной и нежной мышцы близок по интенсивности МРТ-сиг-



Рис. 5. Общий вид трансплантата ПКС: а) гетерогенная структура; б) незначительно гетерогенная; в) гомогенная

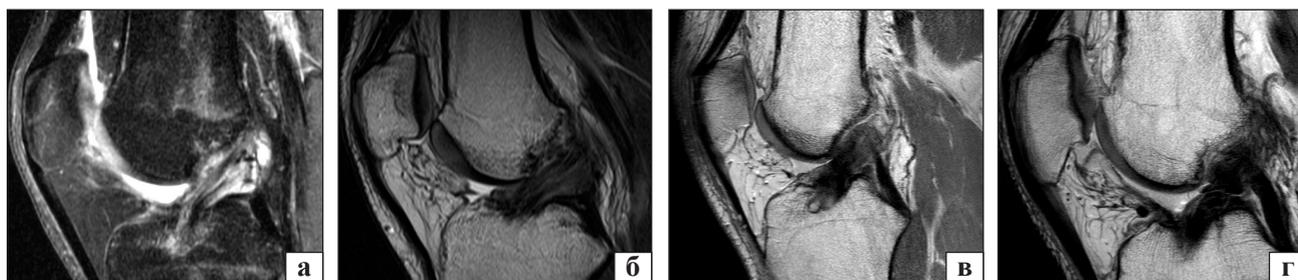


Рис. 6. Динамика перестройки трансплантата на МРТ-сканах через 3 (а), 6 (б), 9 (в) и 12 (г) мес. после артроскопической пластики ПКС

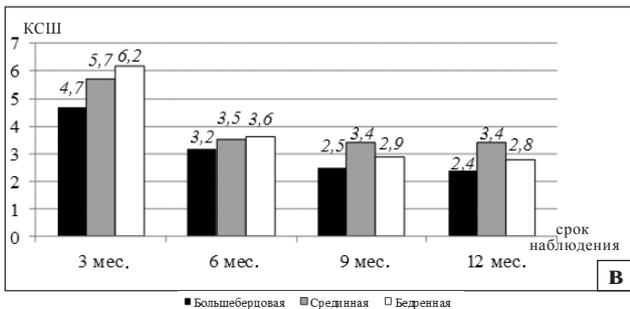
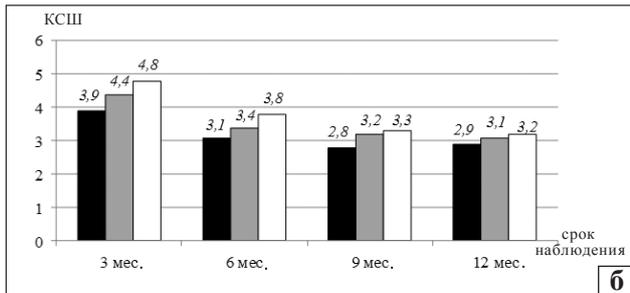
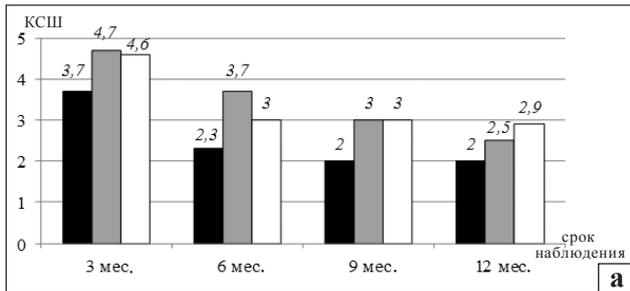


Рис. 7. Диаграммы средних значений КСШ: для сухожилий полуперепончатой мышцы (а); задней крестообразной связки (б); собственной связки надколенника (в) на сагитальных PDW и аксиальных T2 срезах в различные сроки после операции для различных частей трансплантата ПКС

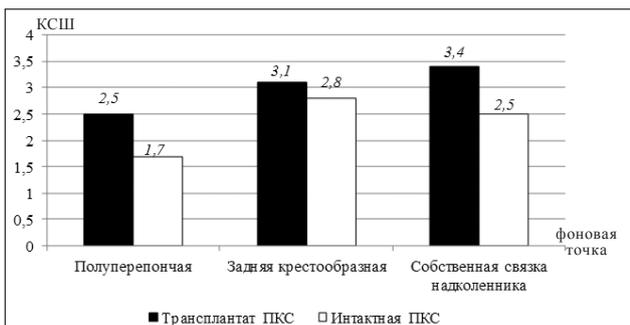


Рис. 8. Диаграмма значений коэффициентов через 12 мес. после реконструкции ПКС для срединных частей трансплантата и интактной ПКС

нала к сухожилию полуперепончатой мышцы, а трансплантат из собственной связки надколенника к собственной связке надколенника.

Мы провели качественную оценку общего вида трансплантата ПКС по степени его однородности, используя трехбалльную шкалу (рис. 5). Полученные результаты представлены в таблице.

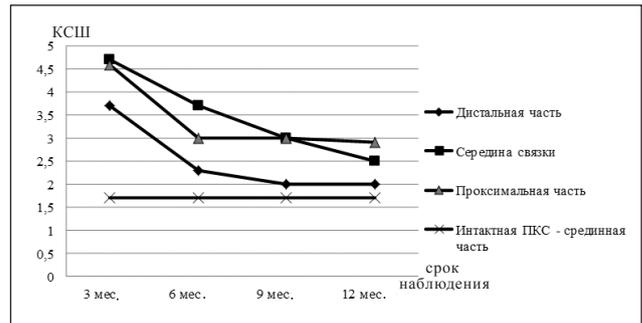


Рис. 9. Средние значения КСШ, когда фоновой точкой было сухожилие полуперепончатой мышцы, для трансплантата ПКС и интактной связки в различные промежутки времени после операции

Из данных таблицы видно, что через 6 мес. только в 4 % случаев (4 человека) общий вид трансплантата был оценен как гетерогенный, причем эти пациенты на протяжении всего периода наблюдения были отнесены к группе гетерогенного трансплантата. Количество больных с незначительно гетерогенным трансплантатом в сроки после операции 3 и 6 мес. оставалось постоянным — 54 человека (57 %), а при осмотре в 9 мес. — уменьшилось до 38 (40 %) и оставалось практически без изменений через 12 мес. — 36 (38 %), что свидетельствует о перестройке трансплантата ПКС на протяжении 9 мес. с момента операции.

При оценке МРТ-картины после пластики ПКС через 3 мес. мы не отнесли ни одного пациента к группе полностью гомогенного трансплантата. Однако при осмотре через 6 мес. количество пациентов в этой группе увеличилось до 37 человек (39 %), а через 9 мес. — до 53 (56 %). Через 12 мес. их количество в этой группе осталось практически без изменений — 55 человек (58 %). Полученные данные также свидетельствуют о том, что динамика лигаментизации достигает своего пика к 9 мес. после операции и далее остается практически неизменной.

Проанализировав результаты можно сделать вывод, что интенсивность МРТ-сигнала от трансплантата ПКС изменяется в динамике в период с момента операции до 9 мес., а с 9 до 12 мес. остается неизменной. Исследуя полученные данные в сравнении с пациентами с интактной ПКС, мы обнаружили, что в период до 12 мес. интенсивность сигнала, а соответственно и цвет трансплантата ПКС, не достигает показателей интактной связки.

Практикующему врачу при оценке послеоперационных МРТ-изображений нужно обра-

Таблица

Оценка общего вида трансплантата ПКС в различные промежутки времени после операции

Структура имплантата ПКС	Срок после операции			
	3 мес.	6 мес.	9 мес.	12 мес.
Гетерогенная	41 (43 %)	4 (4 %)	4 (4 %)	4 (4 %)
Незначительно гетерогенная	54 (57 %)	54 (57 %)	38 (40 %)	36 (38 %)
Гомогенная	—	37 (39 %)	53 (56 %)	55 (58 %)

щать внимание не только на интенсивность цвета от трансплантата, но и сравнивать его с цветом интактных структур коленного сустава, а именно с сухожилием полуперепончатой мышцы, задней крестообразной связкой и собственной связкой надколенника. При использовании трансплантата из сухожилий полусухожильной и нежной мышц, цвет от трансплантата должен быть схожим с цветом от сухожилия полуперепончатой мышцы, а при применении трансплантата из собственной связки надколенника — с интактной собственной связкой надколенника. Также на практике необходимо оценивать гомогенность структуры, то есть его однородность, что отражает качество перестройки трансплантата.

Мы получили данные, согласно которым интенсивность сигнала была достоверно ниже в большеберцовой части трансплантата, чем в срединной и проксимальной, и эта разница сохранялась в течение всего периода наблюдения ($p < 0,05$). Мы считаем, что это обусловлено тем, что во время операции зачастую остается культя связки в месте ее прикрепления к большеберцовой кости. Эта культя в последующем контактирует с трансплантатом ПКС, определяет низкоинтенсивный МРТ-сигнал и обеспечивает биологические факторы для реваскуляризации и более интенсивной перестройки в дистальной части трансплантата.

Выводы

Предложена методика определения динамики восстановления трансплантата ПКС в послеоперационном периоде на основе оценки МРТ-изображений в режимах T2 и взвешенных по протонной плотности (PDW), которая включает анализ интенсивности сигнала с применением КСШ, а также качественную оценку общего вида трансплантата ПКС по степени его однородности с использованием трехбалльной шкалы.

Интенсивность сигнала от трансплантата постепенно уменьшалась при обследовании через 3, 6 и 9 мес. после операции. Сравнивая интенсивность сигнала на сроках в 9 и 12 мес., достоверной разницы не обнаружено. Количество

пациентов с полностью гомогенным трансплантатом ПКС увеличивалось в период от 6 до 9 мес., а от 9 до 12 мес. оставалось практически неизменным. Это свидетельствует о том, что лигаментизация достигает своего пика к 9 мес. после операции и далее остается неизменной.

При сравнении данных МРТ-обследования пациентов после пластики ПКС с показателями лиц с интактной передней крестообразной связкой выявлено, что даже через 12 мес. после операции интенсивность сигнала от трансплантата ПКС не достигает величин неповрежденной связки.

Предложены критерии МРТ-оценки перестройки внутрисуставной части трансплантата ПКС. При анализе МРТ-изображений трансплантата ПКС в режиме T2 и взвешенных по протонной плотности (PDW) необходимо оценивать цвет трансплантата и однородность его структуры. Эти данные следует учитывать при формировании рациональной программы реабилитации, а также для разработки методик, направленных на ускорение динамики биологического ремоделирования трансплантата после реконструкции ПКС.

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие конфликта интересов.

Список литературы

1. Причини розвитку рецидиву передньо-медіальної нестабільності колінного суглобу / С. С. Страфун, Р. О. Сергієнко, О. С. Страфун [та ін.] // Вісник ортопедії, травматології та протезування. — 2010. — № 3. — С. 14–20.
2. Прогнозирование результатов лечения больных с передне-медіальной нестабильностью коленного сустава / С. С. Страфун, Р. О. Сергієнко, О. С. Страфун, С. В. Богдан // Ортопедия, травматология и протезирование. — 2012. — № 2. — С. 64–67. — DOI: 10.15674/0030-59872012264-67.
3. «Biological failure» of the anterior cruciate ligament graft / J. Menetrey, V. B. Duthon, T. Laumonier, D. Fritschy // *Knee Surg. Sports Traumatol. Arthrosc.* — 2008. — Vol. 16 (3). — P. 224–231. — DOI: 10.1007/s00167-007-0474-x.
4. Biomechanical properties and vascularity of an anterior cruciate ligament graft can be predicted by contrast-enhanced magnetic resonance imaging : a two-year study in sheep / A. Weiler, G. Peters, J. Maurer [et al.] // *Am J. Sports Med.* — 2001. — Vol. 29 (6). — P. 751–761.
5. Chen C. H. Graft healing in anterior cruciate ligament reconstruction / C. H. Chen // *Sports Med. Arthrosc. Rehabil. Ther. Technol.* — 2009. — Vol. 1 (1). — Article 21. — DOI: 10.1186/1758-2555-1-21.

6. Crawford S. N. Long-term failure of anterior cruciate ligament reconstruction / S. N. Crawford, B. R. Waterman, J. H. Lubowitz [et al.] // *Arthroscopy*. — 2013. — Vol. 29 (9). — P. 1566–1571. — DOI: 10.1016/j.arthro.2013.04.014.
7. Deehan D. J. The biology of integration of the anterior cruciate ligament / D. J. Deehan, T. E. Cawston // *J. Bone Joint Surg. Br.* — 2005. — Vol. 87 (7). — P. 889–895. — DOI: 10.1302/0301-620X.87B7.16038.
8. Does the tibial remnant of the anterior cruciate ligament promote ligamentization? / B. I. Lee, B. M. Kim, D. H. Kho [et al.] // *Knee*. — 2016. — Vol. 23. — P. 160–168. — DOI: 10.1016/j.knee.2016.09.008.
9. Electron microscopy of the remodelling process in hamstring tendon used as ACL graft / S. Zaffagnini [et al.] // *Knee Surg. Sports Traumatol. Arthrosc.* — 2010. — Vol. 18 (8). — P. 2105–2108. — DOI: 10.1007/s00167-009-0925-7.
10. Gohil S. Anterior cruciate ligament reconstruction using autologous double hamstrings : a comparison of standard versus minimal debridement techniques using MRI to assess revascularization / S. Gohil, P. O. Annear, W. Breidahl // *J. Bone Joint Surg. Br.* — 2007. — Vol. 89 (9). — P. 1165–1171. — DOI: 10.1302/0301-620X.89B9.19339.
11. Hodqson R. G. Tendon and ligament imaging / R. G. Hodqson, P. J. O'Connor, A. J. Grainger // *Br. J. Radiol.* — 2012. — Vol. 85 (1016). — P. 1157–1172. — DOI: 10.1259/bjr/34786470.
12. Ligamentization of tendon grafts treated with an endogenous preparation rich in growth factors : gross morphology and histology / M. Sanchez, E. Anitua, J. Azofra [et al.] // *Arthroscopy*. — 2010. — Vol. 26 (4). — P. 470–480. — DOI: 10.1016/j.arthro.2009.08.019.
13. Magnetic resonance imaging evaluation of the integration and maturation of semitendinosus-gracilis graft in anterior cruciate ligament reconstruction using autologous platelet concentrate / D. Figueroa, P. Melean, R. Calvo [et al.] // *Arthroscopy*. — 2010. — Vol. 26 (10). — P. 1318–1325. — DOI: 10.1016/j.arthro.2010.02.010.
14. Mariscalco M. W. The influence of hamstring autograft size on patient-reported outcomes and risk of revision after anterior cruciate ligament reconstruction : a Multicenter Orthopaedic Outcomes Network (MOON) Cohort Study / M. W. Mariscalco, D. C. Flanigan, J. Mitchell [et al.] // *Arthroscopy*. — 2013. — Vol. 29 (12). — P. 1948–1953. — DOI: 10.1016/j.arthro.2013.08.025.
15. MRI from picture to proton / D. W. McRobbie, E. A. Moore, M. J. Graves, M. R. Prince. — 2nd ed. — Cambridge: Cambridge University Press, 2006. — Access mode : <https://ucrfisicamedica.files.wordpress.com/2010/10/mri.pdf>.
16. Plotkin B. E. Stump entrapment of the torn anterior cruciate ligament / B. E. Plotkin, V. K. Agarwal, R. Varma // *Radiol. Case Rep.* — 2016. — Vol. 4 (1). — P. 268–272. — DOI: 10.2484/rcr.v4i1.268.
17. Reconstructed anterior cruciate ligaments using patellar tendon ligament grafts: diagnostic value of contrast enhanced MRI in a 2 year follow-up regimen / T. J. Vogl, J. Schmitt, J. Lubrich [et al.] // *Eur. Radiol.* — 2001. — Vol. 11. — P. 1450–1456. — DOI: 10.1007/s003300100870.
18. Remodelling of human hamstring autografts after anterior cruciate ligament reconstruction / R. P. Janssen, J. van der Wijk, A. Fiedler [et al.] // *Knee Surg. Sports Traumatol. Arthrosc.* — 2011. — Vol. 19 (8). — P. 1299–1306. — DOI: 10.1007/s00167-011-1419-y.
19. The «ligamentization» process in anterior cruciate ligament reconstruction : what happens to the human graft? A systematic review of the literature / S. Claes, P. Verdonk, R. Forsyth, J. Bellemans // *Am. J. Sports Med.* — 2011. — Vol. 39 (11). — P. 2476–2483. — DOI: 10.1177/0363546511402662.
20. The extracellular remodeling of free-soft-tissue autografts and allografts for reconstruction of the anterior cruciate ligament : a comparison study in sheep model / M. Dustmann, T. Schmidt, I. Gangey [et al.] // *Knee Surg. Sports Traumatol. Arthrosc.* — 2008. — Vol. 16 (4). — P. 360–369. — DOI: 10.1007/s00167-007-0471-0.
21. The reharvested patellar tendon has the potential for ligamentization when used for anterior cruciate ligament revision surgery / S. Stener, L. Ejerhed, T. Movin [et al.] // *Knee Surg. Sports Traumatol. Arthrosc.* — 2012. — Vol. 20. — P. 1168–1174. — DOI: 10.1007/s00167-012-1908-7.
22. Value of MRI in assessment of cruciate ligament replacement / U. Stockle, R. Hoffmann, J. Schwedtko [et al.] // *Unfallchirurg*. — 1997. — Vol. 100 (3). — P. 212–218.

DOI: <http://dx.doi.org/10.15674/0030-598720164>

Статья поступила в редакцию 31.10.2016