

DOI: 10.15593/RZhBiomech/2020.4.08  
УДК 617-089.844



## ПРИМЕНЕНИЕ СУХОЖИЛИЯ ДЛИННОЙ МАЛОБЕРЦОВОЙ МЫШЦЫ ПРИ ПЛАСТИКЕ ПЕРЕДНЕЙ КРЕСТООБРАЗНОЙ СВЯЗКИ: БИОМЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТРАНСПЛАНТАТА, КОРРЕЛЯЦИОННЫЕ ВЗАИМОСВЯЗИ

**А.В. Лычагин<sup>1</sup>, Р.И. Алиев<sup>1</sup>, В.Б. Богатов<sup>1</sup>, С.Н. Чурбанов<sup>1,2</sup>, П.С. Тимашев<sup>1,3,4</sup>,  
А.В. Музыченков<sup>1</sup>, А.В. Гаркави<sup>1</sup>, П.И. Петров<sup>1</sup>, М.М. Липина<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Первый Московский государственный медицинский университет имени И.М. Сеченова Минздрава России, Российская Федерация, 119991, Москва, ул. Трубецкая, 8, стр. 2

<sup>2</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Российская Федерация, 119991, Москва, Ленинские горы, 1

<sup>3</sup> Институт фотонных технологий Федерального научно-исследовательского центра «Кристаллография и фотоника» Российской академии наук, Российская Федерация, Москва, г. Троицк, ул. Пионерская, 2, e-mail: visokol@rambler.ru

<sup>4</sup> Институт химической физики имени Н.Н. Семенова Российской академии наук, Российская Федерация, 119991, Москва, ул. Косыгина, 4, e-mail: icp@chph.ras.ru

**Аннотация.** Операция по замещению передней крестообразной связки при её повреждениях на сегодняшний день является одной из самых частых в спортивной травматологии. Существует немало оперативных методов её выполнения, но одним из самых частых вопросов является выбор трансплантата для её замещения. Учитывая, что трансплантат должен выдерживать нагрузки, сравнимые с интактной связкой, необходимо выбрать наиболее подходящую для этих целей ткань человека. В данной статье рассматриваются биомеханические характеристики сухожилия длинной малоберцовой мышцы в качестве трансплантата для передней крестообразной связки. Полученные результаты позволили оценить механические свойства полученного из сухожилия длинной малоберцовой мышцы трансплантата, сопоставить полученные данные с имеющимися в литературе данными, описывающими механические свойства применяемых трансплантатов, и показать, что выбранный авторами для оценки в настоящем исследовании трансплантат не уступает по своим свойствам уже применяемым. Наличие корреляционной взаимосвязи между диаметром трансплантата и полом пациентов дает возможность предположить, что

© Лычагин А.В., Алиев Р.И., Богатов В.Б., Чурбанов С.Н., Тимашев П.С., Музыченков А.В., Гаркави А.В., Петров П.И., Липина М.М., 2020

Лычагин Алексей Владимирович, д.м.н., заведующий кафедрой травматологии, ортопедии и хирургии катастроф, Москва

Алиев Руслан Исаевич, ассистент кафедры травматологии, ортопедии и хирургии катастроф, Москва

Богатов Виктор Борисович, д.м.н., профессор кафедры травматологии, ортопедии и хирургии катастроф, Москва

Чурбанов Семен Николаевич, младший научный сотрудник Института регенеративной медицины, Москва

Тимашев Петр Сергеевич, д.х.н., директор научно-технологического парка биомедицины, директор Института регенеративной медицины, Москва

Музыченков Алексей Владимирович, к.м.н., ассистент кафедры травматологии, ортопедии и хирургии катастроф, Москва

Гаркави Андрей Владимирович, д.м.н., профессор кафедры травматологии, ортопедии и хирургии катастроф, Москва

Петров Павел Игоревич, к.м.н., ассистент кафедры травматологии, ортопедии и хирургии катастроф, Москва

Липина Марина Михайловна, к.м.н., доцент кафедры травматологии, ортопедии и хирургии катастроф, Москва

дальнейший подробный статистический анализ позволит определить возможность точного прогноза диаметра трансплантата для качественного предоперационного планирования.

**Ключевые слова:** сухожилие длинной малоберцовой мышцы, передняя крестообразная связка, биомеханические особенности.

## ВВЕДЕНИЕ

Актуальность выбора трансплантата с учетом его механических свойств при экстр- и интраартикулярных повреждениях подтверждается большим количеством исследований. Такая активность в исследовательской работе, безусловно, является показателем заинтересованности в поисках оптимального трансплантата и методики его фиксации [1].

Имеющиеся осложнения, связанные с традиционными методиками, зачастую ограничивают их применение. К традиционным методикам можно отнести следующие: с применением ауто трансплантата сухожилий *m. Hamstring*, *bone-patellar tendon-bone (BPTB)*, сухожилия четырехглавой мышцы бедра и синтетического аллогraftа. Несмотря на традиционность и широту применения, вопрос о послеоперационных осложнениях остается открытым. Так, например, частые осложнения после аутопластики по методике *BPTB* – боль в переднем отделе сустава, крепитация, потеря чувствительности, перелом надколенника, контрактура, ограничение разгибания нижней конечности неоднократно упоминаются в различных литературных источниках, в том числе мета-анализах [11, 21]. Применение сухожилия четырехглавой мышцы также может быть ограничено возникающими в послеоперационном периоде осложнениями, в основном проявляющимися мышечной слабостью и разрывами. Тем не менее данный трансплантат активно применяется, особенно после появления данных о хороших функциональных результатах, не уступающих другим методикам. Несмотря на достаточно хорошие результаты, получаемые при пластике передней крестообразной связки с применением ауто трансплантатов, не пропадает интерес и к аллотрансплантатам, как к синтетическим, так и донорским. Возможность использования донорских трансплантатов ограничена риском иммунной реакции, риском заражения заболеваниями, а также замедленным приживлением или возможностью отторжения. Некоторые из перечисленных рисков снижаются при применении синтетического материала. Помимо риска инфицирования уменьшается и риск хирургической травмы донорской конечности, то есть той конечности, с которой производится забор трансплантата. Нередко сокращается реабилитационный период [20].

В настоящее время сухожилие длинной головки малоберцовой мышцы все чаще применяется при ортопедических операциях с целью функционального восстановления связочного аппарата, например, при восстановлении дельтовидной связки, медиальной пателло-фemorальной связки, медиальной коллатеральной связки, передней крестообразной связки, подошвенной пяточно-ладьевидной связки, ахиллова сухожилия [4, 5, 8 11, 15, 16, 19]. Долгосрочные результаты применения данного трансплантата отсутствуют, однако имеющиеся данные 2–3-летних послеоперационных результатов обнадеживают [11, 15, 19]. Признаки гипотрофии четырехглавой мышцы в послеоперационном периоде минимальны при сравнении с применением сухожилий *m. Hamstring*, когда в 58 % случаев возможно уменьшение объема бедра на 10 мм и более [14]. Компенсация функции данного сухожилия осуществляется его синергистом-сухожилием короткой малоберцовой мышцы [8, 15]. Пластика передней крестообразной связки с помощью сухожилия длинной



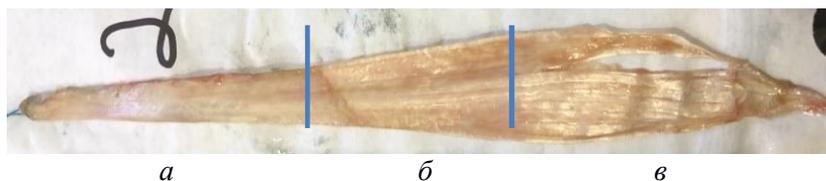


Рис. 1. Зоны трансплантата сухожилия длинной малоберцовой мышцы:  
*a* – проксимальная часть трансплантата; *б* – центральная часть трансплантата;  
*в* – дистальная часть трансплантата

специально разработанной камеры с теплым раствором *PBS* для обеспечения физиологического состояния тканей. Для анализа механических свойств применяли модуль Юнга, предел прочности, оценку деформации при разрушении.

### ЗАБОР ТРАНСПЛАНТАТА

Положение пациента на операционном столе – на спине. Анестезия эпидуральная. Забор трансплантата производился без предварительного наложения турникета после предварительной обработки операционного поля растворами антисептиков.

Все трансплантаты взяты по одинаковой методике (рис. 2, *а–ж*) из линейного двухсантиметрового разреза в проекции наружной лодыжки и сухожилия длинной малоберцовой мышцы (рис. 2, *а, б*). После визуализации сухожилие прошивалось, отсекалось дистально, далее производился забор при помощи стриппера (рис. 2, *в–е*). Диаметр трансплантата измерялся при помощи цилиндра *Smith and Nephew*, с шагом 0,5 мм (рис. 2, *ж*).

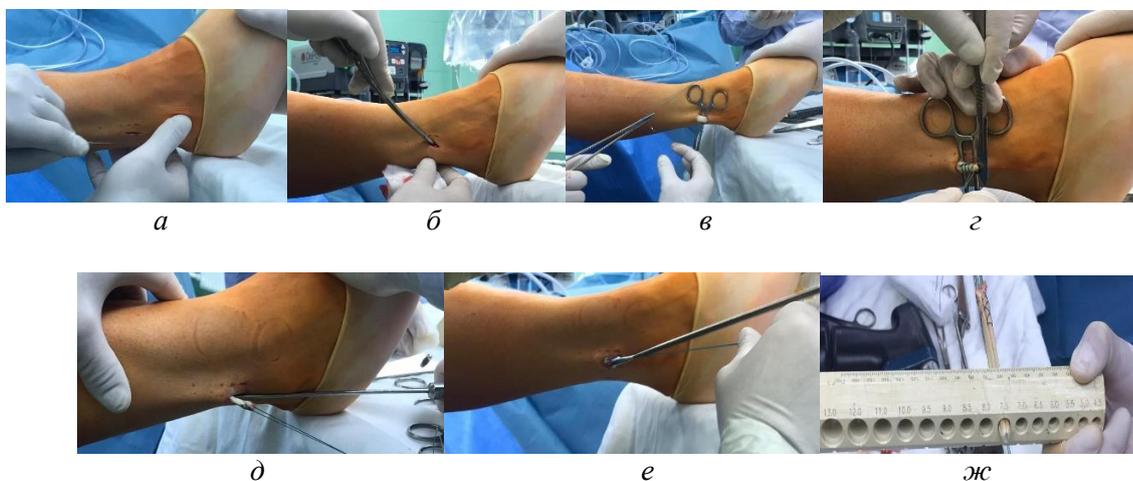


Рис. 2. Этапы забора трансплантата

### СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

Для статистической обработки использовались стандартные статистические пакеты: *Statistica 10.0* и *IBM SPSS Statistics 22.0*. При проведении статистической обработки результатов исследования для определения распределения на нормальность использовался критерий Колмогорова–Смирнова. Значения непрерывных величин с нормальным распределением представлены в виде  $M \pm SD$ , где  $M$  – выборочное среднее,  $SD$  – стандартное отклонение. Корреляционный анализ проводился при помощи критерия Спирмена и Кендалла. Для описания качественных признаков использовались относительные (%) и абсолютные частоты.

Статистический анализ экспериментальных количественных данных в ходе тестирования биомеханических трансплантатов был проведен с помощью стандартного пакета программы *GraphPad Prism version 8.00 for Windows (GraphPad Software, Inc.)*. Нормальное распределение количественных данных было проверено с применением теста Шапиро–Уилка. Межгрупповые различия были проанализированы ANOVA с применением многократного теста сравнения Тьюки. Статистически значимыми считались различия при  $p < 0,05$ .

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Характеристика пациентов представлена в табл. 1. Разрыв передней крестообразной связки правого коленного сустава встречался чаще, чем левого. По механизму преобладала спортивная травма. Диаметр трансплантата определялся интоперационно и в среднем составил ( $7,57 \pm 0,650$ ) мм.

В ходе проведенного статистического анализа выявлена статистически значимая корреляция (на уровне значимости 0,01) между параметрами пол и диаметр. Корреляционной взаимосвязи диаметра трансплантата с возрастом и стороной повреждения передней крестообразной связки (правым или левым коленным суставом) не обнаружено.

Таблица 1

Характеристика пациентов

Больные	Количество, чел.	Левый коленный сустав	Правый коленный сустав	Средний диаметр трансплантата, мм	Средний возраст пациентов, лет
Мужчины	407	178	229	$7,67 \pm 0,660$	$34,03 \pm 9,693$
Женщины	171	85	86	$7,33 \pm 0,554$	$38,33 \pm 13,669$
Всего	578	263	315	$7,57 \pm 0,650$	$35,29 \pm 11,12$

## БИОМЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТРАНСПЛАНТАТА

Было обнаружено, что центральная часть трансплантата (см. рис. 1) обладала наибольшими механическими качествами (табл. 2). Для различных разделов трансплантата заметна существенная разница в значениях. Сравнивая полученные данные, можно сделать вывод, что сопротивление упругим и неупругим деформациям увеличивается от верхней до нижней части образца. Возможно, это связано с особенностями гистологического строения сухожилия: оно оказалось слабее в той части, где анатомически переходит в мышцу.

Полученные данные свидетельствуют о хороших механических свойствах трансплантата, которые не уступают свойствам трансплантатов, уже активно применяемых в клинической практике [9, 10, 17, 20]. Обращает на себя внимание достаточно большое расхождение данных *T. Wilson* (1999) по сухожилию длинной малоберцовой мышцы и нашими результатами (табл. 3). Разница составляет более чем в 2 раза. Возможно, это связано с участком трансплантата, который использовался в тестах. В наших данных средние показатели модуля Юнга сухожилия в зависимости от зоны варьировались почти в 5 раз. Достаточно большую разницу в показателях максимальной нагрузки для неповрежденной передней крестообразной связки

в исследовании В.Б. Богатова и соавт. (2018) [10] и трансплантатами, полученными из других тканей, можно объяснить тем, что анализу подвергались различные ткани – связка и сухожилия (связка надколенника является сухожилием четырёхглавой мышцы бедра). К тому же в работе В.Б. Богатов (2018) исследовал неповреждённые крестообразные связки свиней, а другие авторы – человеческие ткани.

Таблица 2

**Прочностные характеристики трансплантата сухожилия длинной малоберцовой мышцы в зависимости от его зоны**

Фрагмент сухожилия	Модуль Юнга, МПа	Максимальная нагрузка, Н	Деформация при максимальной нагрузке (растяжение), %
Центральная часть	564,6	469,69	5,164
Проксимальная часть	142,4	190	22,067
Дистальная часть	624,2	349,35	2,228

Таблица 3

**Основные биомеханические критерии трансплантатов передней крестообразной связки**

Образец	Возраст пациентов, лет	Модуль Юнга, МПа	Максимальная нагрузка, Н	Деформация при максимальной нагрузке (растяжение), %
Связка надколенника (T. Wilson, 1999)	37,5 ± 7,1	225,2	580,4	13
Сухожилие длинной малоберцовой мышцы (T. Wilson, 1999)	34,0 ± 8,7	144,8	538,2	9
Неповреждённая передняя крестообразная связка (В.Б. Богатов, 2018)	----	800,6	840,25	9,3
Сухожилие длинной малоберцовой мышцы (собств. данные)	35,29 ± 11,12	368,1	462,42	4,9

Как следует из результатов табл. 3, наибольшим растяжением обладала проксимальная часть сухожилия. В этой зоне его деформация увеличивалась более чем в 4 раза. Это имеет важное значение для выполнения операции по замещению повреждённой передней крестообразной связки, так как эта зона менее пригодна в качестве трансплантата ввиду её чрезмерной растяжимости.

Несмотря на то, что в настоящее время пластика передней крестообразной связки является одной из самых часто выполняемых операций на коленном суставе и принятые в качестве «золотых стандартов» методики и трансплантаты показывают хорошие результаты, сохраняется много нерешённых проблем, поэтому возможность применения новых методик, а также подбор оптимального трансплантата, улучшение его механических свойств достаточно актуальна.

## Выводы

1. Полученные результаты позволили оценить механические свойства полученного из сухожилия длинной малоберцовой мышцы трансплантата, которые могут соответствовать биомеханическим показателям неповрежденной передней крестообразной связки.

2. Трансплантат, полученный из сухожилия длинной малоберцовой мышцы, не уступает по своим прочностным свойствам, уже применяемым в клинической практике тканям.

3. Определена корреляционная взаимосвязь между диаметром трансплантата и полом пациентов, что позволяет осуществить более качественное предоперационное планирование.

4. Различные отделы трансплантата сухожилия длинной малоберцовой мышцы имеют существенную разницу в значениях предела прочности и деформации при разрушении.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Богатов В.Б., Лычагин А.В., Дрогин А.Р., Чекулаев Е.А. Механическая прочность фиксации имплантов передней крестообразной связки // *Российский журнал биомеханики*. – 2018. – Т. 22, № 3. – С. 390–397.
2. Albano D., Cortese M.C., Duarte A. et al. Predictive role of ankle MRI for tendon graft choice and surgical reconstruction // *Radiol. Med.* – 2020. – Vol. 125. – P. 763–769.
3. Angthong C., Chernchujit B., Apivatgaroon A., Chaijenkit K., Nualon P., Suchao-in K. The anterior cruciate ligament reconstruction with the peroneus longus tendon: a biomechanical and clinical evaluation of the donor ankle morbidity // *J. Med. Assoc. Thai.* – 2015. – Vol. 98. – P. 555–560.
4. Apinun J., Jenvorapoj S., Arirachakaran A., Kongtharvonskul J. Clinical outcomes of chronic Achilles tendon rupture treated with flexor hallucis longus grafting and flexor hallucis longus grafting plus additional augmentation: A meta-analysis // *Foot Ankle Surg.* – 2019. – Vol. 19, no. 7. – P. 717–722. DOI: 10.1016/j.fas.2019.09.006
5. Ellis S.J., Williams B.R., Wagshul A.D., Pavlov H., Deland J.T. Deltoid ligament reconstruction with peroneus longus autograft in flatfoot deformity // *Foot Ankle Int.* – 2010. – Vol. 31. – P. 781–789.
6. Kerimoğlu S., Aynaci O., Saraçoğlu M., Aydın H., Turhan A.U. Anterior cruciate ligament reconstruction with the peroneus longus tendon // *Acta Orthop. Traumatol. Turc.* – 2008. – Vol. 42. – P. 38–43.
7. Nazem K., Barzegar M., Hosseini A., Karimi M. Can we use peroneus longus in addition to hamstring tendons for anterior cruciate ligament reconstruction? // *Adv. Biomed. Res.* – 2014. – Vol. 3. – P. 115–121.
8. Otis J.C., Deland J.T., Lee S., Gordon J. Peroneus brevis is a more effective evertor than peroneus longus // *Foot & Ankle Int.* – 2004. – Vol. 25. – P. 242–246.
9. Palmer J.E., Russell J.P., Grieshaber J. et al. A biomechanical comparison of iliopectoral tendons for ligament reconstruction // *Am. J. Sports Med.* – 2017. – Vol. 45. – P. 701–707.
10. Rhatomy S., Asikin A., Wardani A.E., Rukmoyo T., Lumban-Gaol I., Budhiparama N.C. Peroneus longus autograft can be recommended as a superior graft to hamstring tendon in single-bundle ACL reconstruction // *Knee Surg. Sports Traumatol. Arthrosc.* – 2019. – Vol. 27. – P. 3552–3559.
11. Rhatomy S., Hartoko L., Setyawan R., Soekarno N.R., Asikin A.I.Z., Pridianto D., Mustamsir E. Single bundle ACL reconstruction with peroneus longus tendon graft: 2-years follow-up // *J. Clin. Orthopedic Trauma.* – 2020. – Vol. 11, suppl. 3. – P. S332–S336.
12. Sasetyo D.R., Rhatomy S., Pontoh L.A. Peroneus longus tendon: the promising graft for anterior cruciate ligament reconstruction surgery // *Asia Pac. J. Sport. Med. Arthrosc. Rehabil. Technol.* – 2017. – Vol. 9. – P. 25–30.
13. Shao X., Shi L.L., Bluman E.M. et al. Satisfactory functional and MRI outcomes at the foot and ankle following harvesting of full thickness peroneus longus tendon graft // *Bone Joint J.* – 2020. – Vol. 102. – P. 205–211.
14. Shi F.-D., Hess D.E., Zuo J.-Z., Liu S.-J., Wang X.-C., Zhang Y., Meng X.-G., Cui Z.-J., Zhao S.-P., Li C.-J., Hu W.-N. Peroneus longus tendon autograft is a safe and effective alternative for anterior cruciate ligament reconstruction // *J. Knee Surg. Ortopedic.* – 2018. – Vol. 32, no. 8. – P. 804–811.
15. Wagshul A.D., Williams B.R., Ellis S.J., Pavlov H., Deland J.T. Deltoid ligament reconstruction with peroneus longus autograft in flatfoot deformity // *Foot Ankle Int.* – 2010. – Vol. 31. – P. 781–789.

16. Williams B.R., Ellis S.J., Deyer T.W., Pavlov H., Deland J.T. Reconstruction of the spring ligament using a peroneus longus autograft tendon transfer // *Foot Ankle Int.* – 2010. – Vol. 31. – P. 567–571.
17. Wilson T.W., Zafuta M.P., Mark Z.A. Biomechanical analysis of matched bone-patellar tendon-bone and doublelooped semitendinosus and gracilis tendon grafts // *Am. J. Sports Med.* – 1999. – Vol. 27. – P. 202–207.
18. Xu C., Zhao J., Xie G. Medial patella-femoral ligament reconstruction using the anterior half of the peroneus longus tendon as a combined procedure for recurrent patellar instability // *Asia Pac. J. Sport Med. Arthrosc. Rehabil. Technol.* – 2016. – Vol. 4. – P. 21–26.
19. Xu C., Zhao J., Xie G. Science direct medial patella-femoral ligament reconstruction using the anterior half of the peroneus longus tendon as a combined procedure for recurrent patellar instability // *Asia Pac. J. Sport Med. Arthrosc. Rehabil. Technol.* – 2016. – Vol. 4. – P. 21–26.
20. Yang X., Wang F., He X., Feng J.-T., Hu Y.-C., Zhang H., Yang L., Hua K. Network meta-analysis of knee outcomes following anterior cruciate ligament reconstruction with various types of tendon grafts // *International Orthopaedics.* – 2020. – Vol. 44. – P. 365–380.
21. Zhao J.Z., Huangfu X.Q. The biomechanical and clinical application of using the anterior half of the peroneus longus tendon as an autograft source // *Am. J. Sports Med.* – 2012. – Vol. 40. – P. 662–671.

## **APPLICATION OF THE LONG FIBULAR TENDON IN ANTERIOR CRUCIATE LIGAMENT PLASTIC SURGERY: BIOMECHANICAL PROPERTIES OF THE GRAFT, CORRELATION RELATIONSHIPS**

**A.V. Lychagin, R.L. Aliev, V.B. Bogatov, S.N. Churbanov, P.S. Timashev,  
A.V. Muzychenkov, A.V. Garkavi, P.I. Petrov, M.M. Lipina (Moscow, Russian  
Federation)**

Surgery of the anterior cruciate ligament with its injuries is currently one of the most frequent in sports traumatology. There are many methods for its implementation, but one of the most frequent questions is the choice of a transplant to replace it. The graft must withstand loads comparable to an intact ligament. It is necessary to choose the most suitable human tissue for this purpose. This article discusses the biomechanical characteristics of the long tibial tendon as a graft for the anterior cruciate ligament. Our results allowed us to evaluate the mechanical properties of the graft obtained from the tendon of the long fibular muscle, to compare the data obtained with the available literature data describing the mechanical properties of the grafts used, and to show that the graft chosen for evaluation in this study is not inferior in its properties to those already used. The presence of a correlation between the graft diameter and the gender of patients suggests that further detailed statistical analysis will determine the possibility of accurate prediction of the graft diameter for high-quality preoperative planning.

**Key words:** tendon of the long peroneal muscle, anterior cruciate ligament, biomechanical characteristics.

*Получено 1 августа 2020*