

ИЗУЧЕНИЕ БИОМЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МОДЕЛЕЙ ТРАНСПЛАНТАТОВ ИЗ СУХОЖИЛИЯ ПОЛУСУХОЖИЛЬНОЙ И ДЛИННОЙ МАЛОБЕРЦОВОЙ МЫШЦ ДЛЯ ПЛАСТИКИ ПЕРЕДНЕЙ КРЕСТООБРАЗНОЙ СВЯЗКИ

Бальжинимаев Д.Б., Михайлов И.Н., Тишков Н.В.

ФГБНУ «Иркутский научный центр хирургии и травматологии», Иркутск, e-mail: zdrav@iscst.ru

В последние годы в клинической практике широко используется артроскопическое восстановление поврежденной передней крестообразной связки коленного сустава с применением аутосухожилий. Несмотря на высокую эффективность данной оперативной техники, в литературе отмечают отрицательные факторы, связанные со слабой механической прочностью в области базового шва свободных концов трансплантата, что может привести к повторным разрывам восстановленной связки в послеоперационном периоде и на этапе ранней реабилитации. В данной статье представлены результаты изучения биомеханических свойств моделей трансплантатов из сухожилия полусухожильной и 1/2 ширины сухожилия длинной малоберцовой мышц, подготовленных по известной и предложенной новой техникам. В результате экспериментального исследования установлено, что механическая прочность на разрыв модели трансплантата из сухожилия полусухожильной мышцы, подготовленного по стандартной технике, составила $351,8 \pm 133,0$ Н, а механическая прочность модели трансплантата из 1/2 ширины сухожилия длинной малоберцовой мышцы, подготовленной по предлагаемой технике, – $820,52 \pm 140,63$ Н. Полученные результаты показывают, что механическая прочность модели трансплантата из 1/2 ширины сухожилия длинной малоберцовой мышцы, подготовленной по разработанной технике, выше, чем у стандартной техники. Использование данной техники позволит уменьшить риск осложнений, связанных с несостоятельностью трансплантата, в послеоперационном периоде и на ранних этапах реабилитации.

Ключевые слова: повреждения передней крестообразной связки, артроскопия, пластика, трансплантат, аутосухожилия, механическая прочность.

STUDY OF BIOMECHANICAL PROPERTIES OF MODELS OF SEMITENDINOSUS AND PERONEAL LONGUS TENDON GRAFTS FOR ANTERIOR CRUCIATE LIGAMENT PLASTY

Balzhinimaev D.B., Mikhaylov I.N., Tishkov N.V.

Irkutsk Scientific Centre of Surgery and Traumatology, Irkutsk, e-mail: zdrav@iscst.ru

In recent years, arthroscopic restoration of the damaged anterior cruciate ligament of the knee joint with the use of autotendons has been widely used in clinical practice. Despite the high efficiency of this surgical technique, the literature notes negative factors associated with weak mechanical strength in the area of the base suture of the free ends of the graft, which can lead to repeated ruptures of the restored ligament in the postoperative period and at the stage of early rehabilitation. This article presents the results of studying the biomechanical properties of models of grafts from the tendon of the semitendinosus and 1/2 the width of the tendon of the peroneus longus muscles, prepared according to the known and proposed new techniques. As a result of the experimental study, it was found that the mechanical tensile strength of the model of the graft from the tendon of the semitendinosus muscle, prepared according to the standard technique, was 351.8 ± 133.0 N, and the mechanical strength of the graft model from 1/2 the width of the tendon of the long peroneal muscle, prepared according to the proposed technique – 820.52 ± 140.63 N. The results obtained show that the mechanical strength of the graft model of 1/2 the width of the peroneus longus tendon, prepared according to the developed technique, is higher than that of the standard technique. The use of this technique will reduce the risk of complications associated with graft failure in the postoperative period and in the early stages of rehabilitation.

Keywords: injuries of the anterior cruciate ligament, arthroscopy, plastic surgery, graft, autotendon, mechanical strength.

В настоящее время существует множество методик реконструкции ПКС с использованием различных материалов и укрепляющих их швов [1–3]. В литературе выделяются три основные методики реконструкции ПКС: транстибиальная, ретроградная и антеромедиальная. Транстибиальная методика реконструкции ПКС подразумевает

использование двух сухожилий, так как формируется четырехпучковый трансплантат для оптимальных прочностных характеристик формируемого трансплантата [2, 4]. При выполнении реконструкции ПКС по антеромедиальной и ретроградной методикам для достижения четырехпучкового трансплантата достаточно одного сухожилия, так как используется особая техника формирования трансплантата, описанная Lubowitz [5]. В любом случае независимо от используемого одного или двух сухожилий при подготовке трансплантата используется большое количество нитей, которые проходят в толще трансплантата. Шовный материал имеет немаловажное значение, особенно в первые 6 месяцев на этапе ремоделирования трансплантата, поскольку он укрепляет трансплантат и играет важную роль в стабильности коленного сустава в раннем послеоперационном периоде [6, 7]. Кинетическая сила сгибания коленного сустава, воздействующая на трансплантат в реабилитационном периоде, может привести к повторному разрыву или растяжению трансплантата, что, по данным разных авторов, случается в 5–45% случаев [8, 9]. В литературе описано несколько факторов, влияющих на расслабление и растяжение трансплантата, которые связаны с шовным материалом и техникой формирования (прошивания) трансплантата, основным из которых является слабость в области базового шва свободных концов трансплантата. По разным оценкам, случаи разрыва и растяжения в области свободного конца трансплантата достигают 89% [7, 10-12]. Повторные разрывы трансплантата после реконструкции происходят, как правило, на начальных этапах реабилитации в первые 3 месяца. Некоторые авторы связывают это со слабой механической прочностью трансплантата, которая обусловлена несовершенством методики формирования трансплантата, что, в частности, может привести к разрыву свободного конца трансплантата в раннем послеоперационном периоде [11].

Цель исследования: оценить механическую прочность моделей трансплантатов из сухожилий полусухожильной и длинной малоберцовой мышц в эксперименте, подготовленных по разным техникам.

Материал и методы исследования

Для исследования были использованы 60 сухожилий полусухожильной мышцы (средняя длина – $26 \pm 1,7$ см) и 60 сухожилий длинной малоберцовой мышцы (средняя длина – $27 \pm 2,1$ см), взятых у 30 трупов мужчин в возрасте от 32 до 76 лет (средний возраст – $51,7 \pm 14,5$ года), умерших от травм и соматической патологии, не связанной с патологией соединительной ткани. Забор сухожилий производился не позднее 24 ч с момента наступления смерти.

Материал для исследования получали на базе ГБУЗ ИОБСМЭ согласно постановлению Правительства РФ от 21.07.2012 г. № 750 «Об утверждении Правил передачи

невостребованного тела, органов и тканей умершего человека для использования в медицинских, научных и учебных целях, а также использования невостробованного тела, органов и тканей умершего человека в указанных целях» (в соответствии с Федеральным законом от 21.11.2011 г. № 323-ФЗ).

Техника формирования модели трансплантата из сухожилия полусухожильной мышцы способом Lubowitz

Проекционным разрезом послойно по передневнутренней поверхности верхней трети голени рассекали мягкие ткани и выделяли сухожилие полусухожильной мышцы, рассекали зону слияния дистальных частей сухожилий полусухожильной и тонкой мышц до их общего места прикрепления. Лавсановыми нитями № 4 обвивным швом прошивали и отсекали дистальный конец сухожилия полусухожильной мышцы. Стриппер погружали согласно методике (Moore et al. Method for using a tendon stripper and leader set. US Patent 4.773.417 29.09.1988) на глубину около 25 см и забирали трансплантат.

Сшивание модели трансплантата из сухожилия полусухожильной мышцы для исследования формировали следующим образом: концы сухожилия сшивали «конец в конец» лавсановыми нитями № 4, затем сухожилие сгибали так, чтобы получилась четырехпучковая модель трансплантата, концы которой прошивали обвивным швом нитями Vicryl 2-0 по 1,5 см с каждой стороны.

Техника формирования модели трансплантата из 1/2 ширины сухожилия длинной малоберцовой мышцы способом Lubowitz

Пальпаторно определяли сухожилие длинной малоберцовой мышцы проксимальнее голеностопного сустава на 3,0 см и кзади малоберцовой кости; отступив на 1,0 см, выполняли линейный прямой разрез скальпелем длиной 5,0 см. С помощью зажима типа «Москит» раздвигали мягкие ткани до обнаружения искомого сухожилия длинной малоберцовой мышцы, выделяли его на протяжении, прошивали нитями полипропилен № 4 обвивным швом и отсекали дистальный конец сухожилия. Стриппером в проксимальном направлении отсекали и выводили в рану сухожилие длинной малоберцовой мышцы. После забора сухожилия выполняли ушивание операционной раны лавсановыми нитями № 4.

Модель трансплантата из 1/2 ширины сухожилия длинной малоберцовой мышцы формировали аналогично технике формирования из сухожилия полусухожильной мышцы.

Техника формирования модели трансплантата из сухожилия полусухожильной мышцы и 1/2 ширины сухожилия длинной малоберцовой мышцы новым способом

Этапы забора не отличались и описаны выше.

Формирование модели трансплантата из сухожилия полусухожильной мышцы или 1/2 ширины сухожилия длинной малоберцовой мышцы выполняли следующим образом:

усиливали их свободные концы накладным швом с двумя открытыми срезами с помощью лавсановой нити № 4. Один конец сухожилия накладывали на другой, при этом выпуск среза нижнего конца был равен 5–6 мм. Затем прошитый конец отворачивали на срез и накладывали второй ряд швов по ширине сухожилия. Далее прошитую часть сухожилия длинной малоберцовой мышцы двумя рядами швов сгибали пополам так, чтобы получился трансплантат из четырех пучков, и прошивали его обвивным швом на 1,5 см с обоих концов нитями Vicryl 2-0.

Из забранных сухожилий формировали четырехпучковую модель трансплантата длиной 6,3 мм и толщиной от $6,1 \pm 1,14$ до $6,57 \pm 1,25$ мм.

Для исследования механической прочности полученного трансплантата в зависимости от вида сухожилия и техники его формирования полученный материал разделили на четыре группы: 1-я группа – модели трансплантатов из сухожилия полусухожильной мышцы, 2-я группа – модели трансплантатов из 1/2 сухожилия длинной малоберцовой мышцы (формирование трансплантата в этих группах выполняли по известной методике (техника Lubowitz)), 3-я группа – модели трансплантатов из сухожилия полусухожильной мышцы, 4-я группа – модели трансплантатов из 1/2 сухожилия длинной малоберцовой мышцы (формирование трансплантатов в этих двух группах выполняли по авторской методике – Патент РФ № 2717369 от 23.03.2020 г. [13]).

Исследование биомеханических свойств моделей трансплантатов на растяжение проводилось в универсальной разрывной машине Shimadzu AGS-10kNXD на базе ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет».

Подготовленные модели трансплантата фиксировали в импровизированных зажимах со специальными S-образными крюками и закрепляли в разрывной машине (рис. 1).



Рис. 1. Вид фиксации модели трансплантата с помощью металлических крючков в импровизированных зажимах

Для определения биомеханической прочности образцов трансплантатов на растяжение задавали скорость перемещения верхней траверсы 20 мм/мин. После запуска испытания визуально оценивали поведение трансплантата и фиксировали график полициклических нагрузок – кривую «нагрузка – растяжение» с фиксацией разрыва трансплантата, выдаваемую машиной в автоматическом режиме. Параметры растяжения задавались с помощью компьютерной программы TRAPEZIUMX, а результаты данных обрабатывались в автоматическом режиме.

Статистическую обработку данных проводили при помощи компьютерной статистической программы IBM SPSS Statistics 26 для Mac. Использовались непараметрический метод определения статистической значимости различий, критерий Манна–Уитни. Различия в сравниваемых группах считали статистически значимыми при $p < 0,01$.

Результаты исследования и их обсуждение

При исследовании 1-й и 2-й группы моделей трансплантата из сухожилия полусухожильной мышцы и 1/2 сухожилия длинной малоберцовой мышцы, подготовленных по технике Lubowitz, было установлено, что трансплантат при растяжении проходит две стадии пластического разрушения: начальную (1-я фаза разрыва) и конечную (2-я фаза разрыва). Было установлено, что 1-я фаза разрыва трансплантата происходила в точке сшивания свободного конца трансплантата при максимальном приложении силы на трансплантат, далее во 2-й фазе разрыва наступала конечная стадия полного разрушения трансплантата, при этом показатель прикладываемой силы не увеличивался. Полученные данные представлены в таблице 1.

Таблица 1

Результаты исследования механической прочности моделей трансплантатов, подготовленных по известной технике (Lubowitz), при растяжении

Модель трансплантата	<i>n</i>	Среднее	<i>p</i>
Сила СПМ (Lubowitz) (Н)	30	351,84±133	0,000*
Сила СДММ (Lubowitz) (Н)		607,80±193,7	
Растяжение СПМ (Lubowitz) (мм)	30	26,44±14,99	0,015*
Растяжение СДММ (Lubowitz) (мм)		51,38±35,7	

Примечание: СПМ (Lubowitz) – модель трансплантата из сухожилия полусухожильной мышцы, подготовленная известным способом (техника Lubowitz); СДММ (Lubowitz) – модель трансплантата из 1/2 сухожилия длинной малоберцовой мышцы, подготовленная известным способом (техника Lubowitz); *p* – статистическая значимость различий между группами; * – статистически значимые различия между группами, $p \leq 0,05$.

При исследовании 3-й и 4-й группы сформированных трансплантатов из сухожилия полусухожильной мышцы и 1/2 сухожилия длинной малоберцовой мышцы, подготовленных по новой технике, было установлено, что поведение трансплантата по фазам разрыва не отличается от поведения моделей 1-й и 2-й группы, но происходит это при больших величинах прилагаемой силы. Данные представлены в таблице 2.

Таблица 2

Результаты исследования механической прочности моделей трансплантатов, подготовленных по новой технике, при растяжении

Модель трансплантата	<i>n</i>	Среднее	<i>p</i>
Сила СПМ (New) (Н)	30	633,0±193,45	0,000*
Сила СДММ (New) (Н)		820,5±140,6	
Растяжение СПМ (New) (мм)	30	27,07±29,20	0,906
Растяжение СДММ (New) (мм)		17,96±7,52	

Примечание: СПМ (New) – модель трансплантата из сухожилия полусухожильной мышцы, подготовленная новым способом; СДММ (New) – модель трансплантата из сухожилия 1/2 сухожилия длинной малоберцовой мышцы, подготовленная новым способом. *p* – статистическая значимость различий между группами; * – статистически значимые различия между группами, $p \leq 0,05$.

При изучении биомеханической прочности моделей трансплантатов из сухожилия полусухожильной и 1/2 ширины длинной малоберцовой мышц, подготовленных двумя разными техниками, нами было установлено, что разрыв модели трансплантата происходит в две фазы, что соответствует основам биомеханики пластического разрушения. Наиболее значимой точкой в условиях проведенного эксперимента является место сшивания свободного конца сухожилия, где наступает 1-я фаза разрыва. Так, трансплантат из сухожилия полусухожильной мышцы, подготовленный по стандартной методике (Lubowitz), начинал разрушаться при усилии 351,84±133 Н, а изготовленный по предложенной методике с усиливающим швом начинал разрушаться при усилии 633,00±193,45 Н. При изучении поведения на разрыв трансплантата из 1/2 ширины длинной малоберцовой мышцы было установлено, что 1-я фаза разрыва наступает при стандартной методике (Lubowitz) его прошивания при усилии 607,80±14,99 Н, а для начального разрушения трансплантата, подготовленного по предложенной методике, требуется сила 820,52±29,20 Н.

Для того чтобы доказать значимость показанных отличий, использовали статистические критерии (U-критерий Манна–Уитни). Во всех случаях были выявлены статистически значимые отличия между выборками ($p < 0,01$, 0,001).

Кроме этого, нами было отмечено, что имелись отличия в исследуемых группах в зависимости от вида использованного сухожилия; так, показатели были выше для

трансплантата из сухожилия длинной малоберцовой мышцы, что очевидно говорит о ее большей механической прочности и согласуется с данными литературных источников [14]. В задачи нашей работы изучение механических свойств каждого сухожилия не входило.

Заключение

В проведенном исследовании экспериментально доказано, что прочность модели трансплантата, подготовленного по предлагаемому способу с использованием 1/2 ширины сухожилия длинной малоберцовой мышцы, более чем в 2 раза превышает прочность модели трансплантата, подготовленного по известной технике (Lubowitz) с использованием сухожилия полусухожильной мышцы (среднее значение силы, при которой происходит разрыв модели трансплантата, составило $820,5 \pm 140,6$ Н и $351,8 \pm 133,0$ Н соответственно).

Полученные результаты экспериментального исследования позволяют сделать вывод, что использование предлагаемого способа подготовки модели трансплантата из 1/2 сухожилия длинной малоберцовой мышцы с усиливающим швом свободных концов обеспечивает большую механическую прочность в сравнении с известной техникой подготовки модели трансплантата. Также можно предположить, что за счет двух фаз разрыва и усиления базового, свободного конца трансплантата возможно снизить риск повторных разрывов в момент повторной травмы или во время ускоренной реабилитации.

Таким образом, использование нового способа подготовки трансплантата из сухожилия 1/2 длинной малоберцовой мышцы позволит приступить к ранней разработке движений в коленном суставе и улучшить результаты восстановительного периода лечения пациентов с повреждением ПКС.

Список литературы

1. Сластинин В.В., Файн А.М., Ваза А.Ю. Использование трансплантата из сухожилий подколенных мышц для пластики передней крестообразной связки (преимущества, проблемы и пути их решения) // Трансплантология. 2017. Т. 9. № 4. С. 317-324. DOI: 10.23873/2074-0506-2017-9-4-317-324.
2. Matassi F., Sirleo L., Carulli C., Innocenti M. Anatomical anterior cruciate ligament reconstruction: transtibial versus outside-in technique: SIGASCOT Best Paper Award Finalist 2014. Joints. 2015. vol. 3. no. 1. P. 6-14.
3. Hulet C., Sonnery-Cottet B., Stevenson C., Samuelsson K., Laver L., Zdanowicz U., Stufkens S., Curado J., Verdonk P., Spalding T. The use of allograft tendons in primary ACL reconstruction. Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy. 2019. vol. 27. no. 6. P. 1754-1770. DOI: 10.1007/s00167-019-05440-3.

4. Noh J.H., Roh Y.H., Yang B.G., Yi S.R., Lee S.Y. Femoral tunnel position on conventional magnetic resonance imaging after anterior cruciate ligament reconstruction in young men: transtibial technique versus anteromedial portal technique. *Arthroscopy*. 2013. vol. 29. no. 5. P. 882-890. DOI: 10.1016/j.arthro.2013.01.025.
5. Lubowitz J.H. All-inside anterior cruciate ligament graft link: Graft preparation technique. *Arthroscopy Techniques*. 2012. no. 1. P. e165-e168. DOI: 10.1016/j.eats.2012.06.002.
6. Tiefenboeck T.M., Hirtler L., Winnisch M., Joestl J., Koch T., Komjati M., Hofbauer M., Ostermann R.C. A bigger suture diameter for anterior cruciate ligament all-inside graft link preparation leads to better graft stability: An anatomical specimen study. *Knee*. 2018. vol. 25. no. 3. P. 427-433. DOI: 10.1016/j.knee.2018.03.010.
7. Hong C.K., Lin C.L., Chang C.H., Jou I.M., Su W.R. Effect of the number of suture throws on the biomechanical characteristics of the suture-tendon construct. *Arthroscopy*. 2014. vol. 30. no. 12. P. 1609-1615. DOI: 10.1016/j.arthro.2014.06.029.
8. Gabler C.M., Jacobs C.A., Howard J.S., Mattacola C.G., Johnson D.L. Comparison of graft failure rate between autografts placed via an anatomic anterior cruciate ligament reconstruction technique: A systematic review, meta-analysis, and meta-regression. *The American Journal of Sports Medicine*. 2016. vol. 44. no. 4. P. 1069-1079. DOI: 10.1177/0363546515584043.
9. Sanders T.L., Maradit Kremers H., Bryan A.J., Larson D.R., Dahm D.L., Levy B.A., Stuart M.J., Krych A.J. Incidence of anterior cruciate ligament tears and reconstruction: A 21-year population-based study. *The American Journal of Sports Medicine*. 2016. vol. 44. no. 6. P. 1502-1507. DOI: 10.1177/0363546516629944.
10. Yoo J.S., Lee S.J., Jang J.E., Jang Y., Kim C., In Y. Biomechanical comparison of different tendon suturing techniques for three-stranded all-inside anterior cruciate ligament grafts. *Orthopaedics & Traumatology: Surgery and Research*. 2019. vol. 105. no. 6. P. 1101-1106. DOI: 10.1016/j.otsr.2019.06.007.
11. Sasho T., Sasaki T., Hoshi H., Akagi R., Enomoto T., Sato Y., Nakagawa R., Tahara M., Yamaguchi S. Evaluating different closed loop graft preparation technique for tibial suspensory fixation in ACL reconstruction using TightRope™. *Asia-Pacific Journal of Sports Medicine, Arthroscopy, Rehabilitation and Technology*. 2018. no. 12. P. 5-11. DOI: 10.1016/j.asmart.2018.01.002.
12. Wichern C.R., Skoglund K.C., O'Sullivan J.G., Burwell A.K., Nguyen J.T., Herzka A., Brady J.M. A biomechanical comparison of all-inside cruciate ligament graft preparation techniques. *Journal of Experimental Orthopaedics*. 2018. vol. 5. no. 1. P. 42. DOI: 10.1186/s40634-018-0158-0.

13. Бальжинимаев Д.Б., Михайлов И.Н., Пусева М.Э., Тишков Н.В., Монастырев В.В., Пономаренко Н.С. Способ пластики передней крестообразной связки // Патент РФ № 2482808. Патентообладатель ФГБНУ «ИНЦХТ». 2020. Бюл. № 9.
14. Palmer J.E., Russell J.P., Grieshaber J., Iacangelo A. Ellison B.A., Lease T.D., Kim H., Henn R.F. 3rd, Hsieh A.H. A biomechanical comparison of allograft tendons for ligament reconstruction. *The American Journal of Sports Medicine*. 2017. vol. 45. no. 3. P. 701-707. DOI: 10.1177/0363546516671944.