



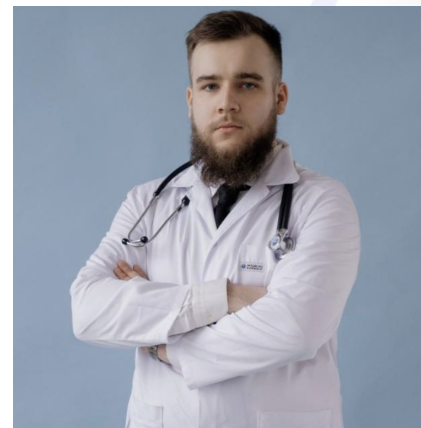
Клиника высоких
медицинских технологий
им. Н. И. Пирогова СПбГУ



Возможности сегментации сухожилий при помощи МРТ для предсказания диаметра трансплантатов ПКС

**Иванов Александр Александрович,
ординатор, аспирант СПбГУ**

**Зезюков Иван Дмитриевич,
ординатор РНИИТО**



Клинический случай – неожиданно тонкий трансплантат

- Во время операции по реконструкции ПКС у 20-летнего пациента было забрано сухожилия хамстринг(ST-G).
- Диаметр графта составил 6,5 мм.
- Что делать в такой ситуации?
- **Использовать трансплантат, несмотря на малый диаметр?**
- **Попытаться увеличить толщину графта? Если да, как?**



Испанский опыт

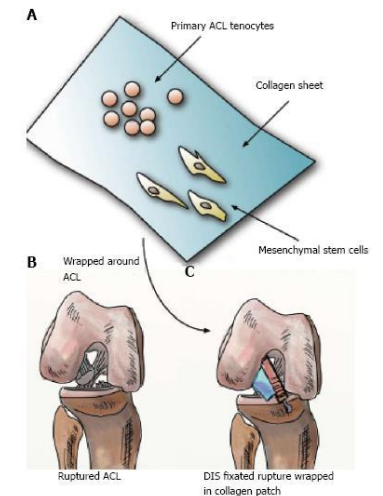
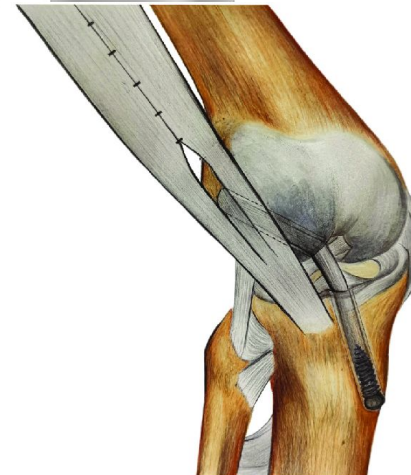
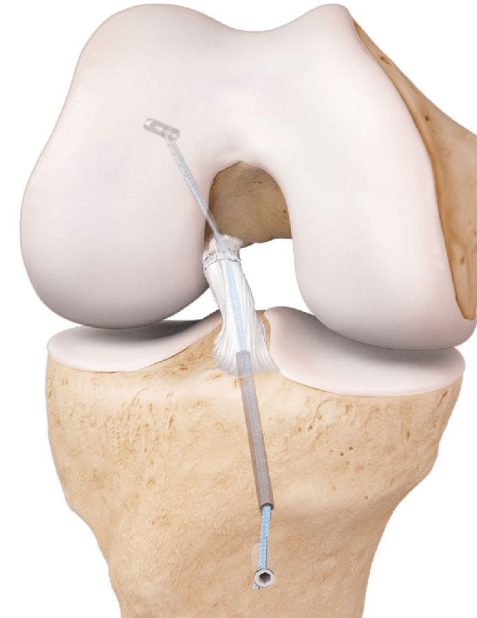
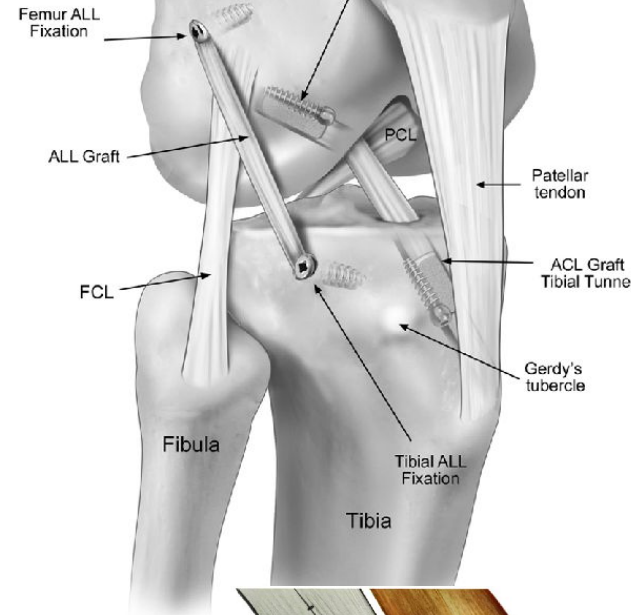
- В 38.2% случаев хирурги выполняют техники увеличения диаметра трансплантата.
- **Увеличение количества фибрилл** – 45.9% хирургов складывают трансплантат более чем в 4 раза.
- ITB – 13.4% случаев.
- QT graft – 8.6% случаев.
- Гибридный ауто-аллотрансплантат – 7% случаев.
- Синтетическое усиление (ленты, тейпы) – 12.4% случаев.
- ALL – 29.9% случаев.
- Биологическая аугментация (ростовые факторы, мезенхимальные клетки) – 5.3% случаев.

How do We Manage an Insufficient Graft Diameter During Anterior Cruciate Ligament Reconstruction? Current Situation in Spain

R García Barcenilla^{1*}, C Santos Ledo², A Cruz Cámara³ and X Pelfort López⁴



Клиника высоких
медицинских технологий
им. Н. И. Пирогова СПбГУ



Как предсказать?

- Недостаточный диаметр трансплантата (<8 мм) связан с повышенным риском несостоятельности.
- По данным крупного исследования (782 пациента), у больных с диаметром трансплантата <8 мм риск повторной реконструкции оказался в 7,2 раза выше, чем при диаметре ≥8 мм

- На сегодняшний день доступны следующие методы:

Ультразвуковое исследование (УЗИ)

Консультация опытного хирурга (субъективный прогноз)

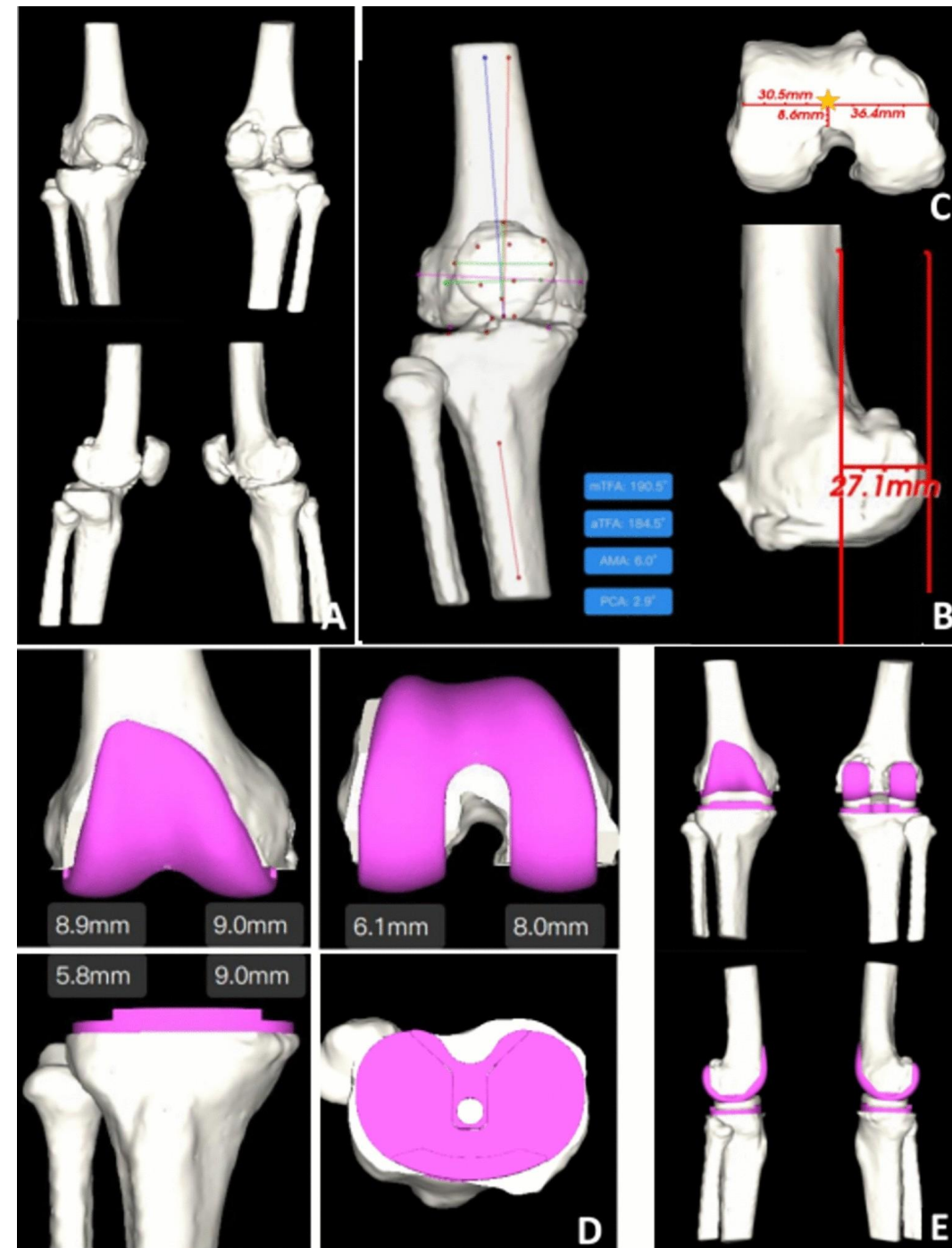
Компьютерная томография (КТ)

Антропометрические показатели (рост, вес, индекс массы тела)

Магнитно-резонансная томография (МРТ)

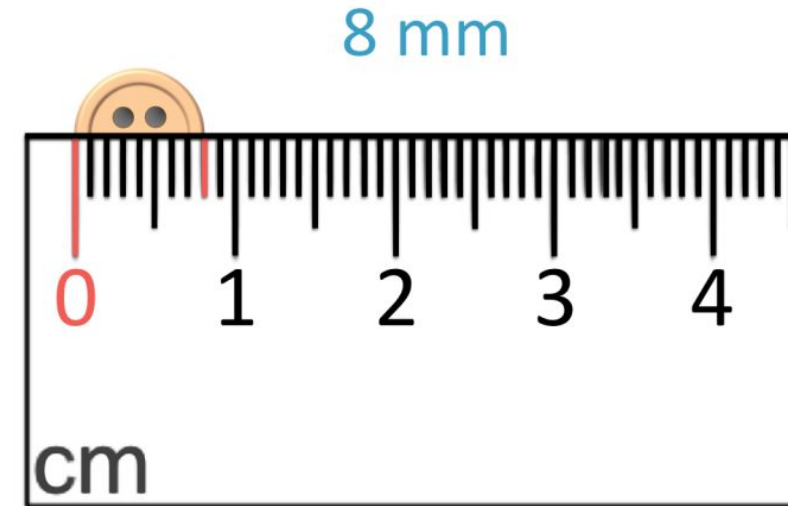
Autograft diameter in ACL reconstruction: size does matter

[Fahad NA Alkhalaf](#)¹, [Sager Hanna](#)¹, [Mohammed Saleh Hattab Alkhalidi](#)¹, [Fares Alenezi](#)¹, [Aliaa Khaja](#)^{1,*}



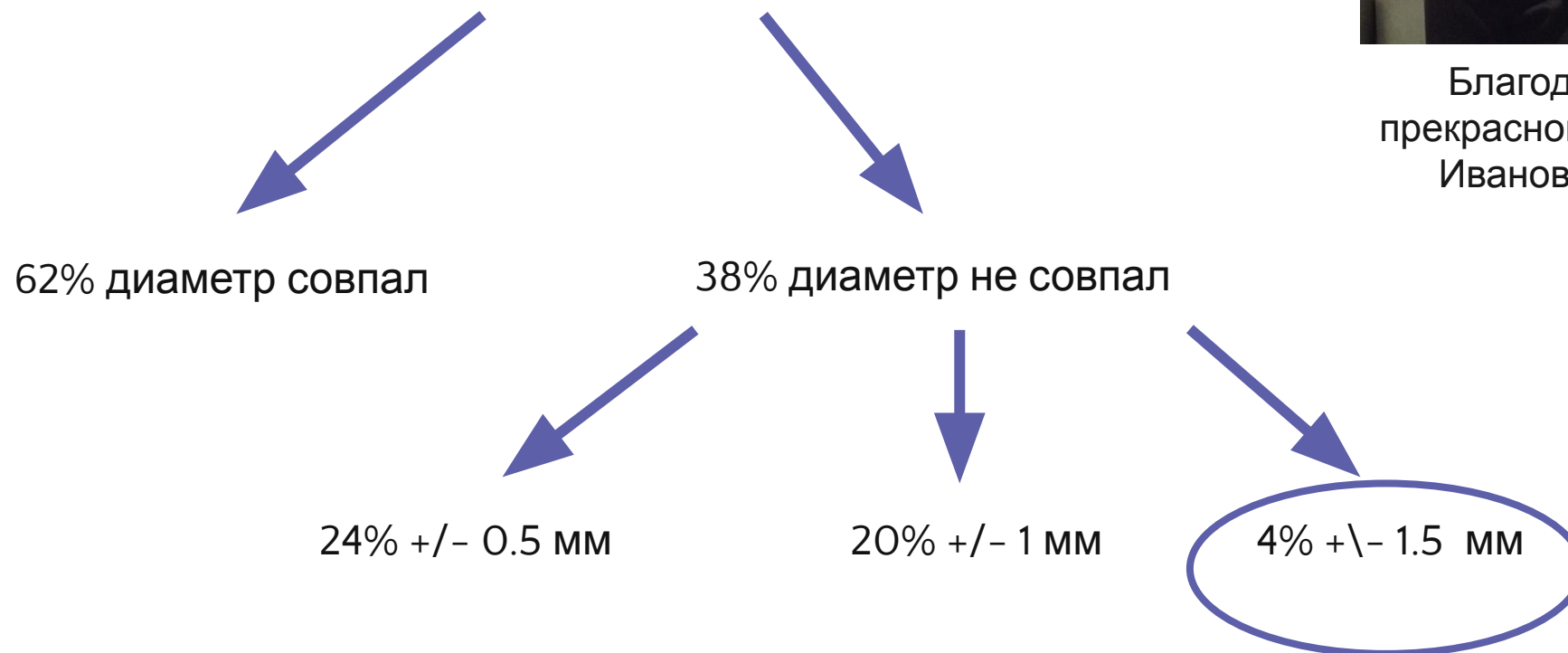
Вопросы для обсуждения

- Существует ли метод, который надежно предсказывает размер графта?
- Возможно ли достичь достоверной бинарной логики (больше или меньше 8 мм)



Мнение хирурга наш опыт

100 пациентов



Благодарность
прекрасному ортопеду
Ивановой Юлии

УЗИ- методика

Точность УЗИ может превышать точность МРТ в прогнозировании диаметра трансплантата:

- точность УЗИ – 70–86%(при бинарной логике)

Преимущества метода:

Значительно дешевле МРТ

Отсутствие ионизирующего излучения

Динамическое исследование в реальном времени

Чувствительность 83% для выявления слишком тонких сухожилий

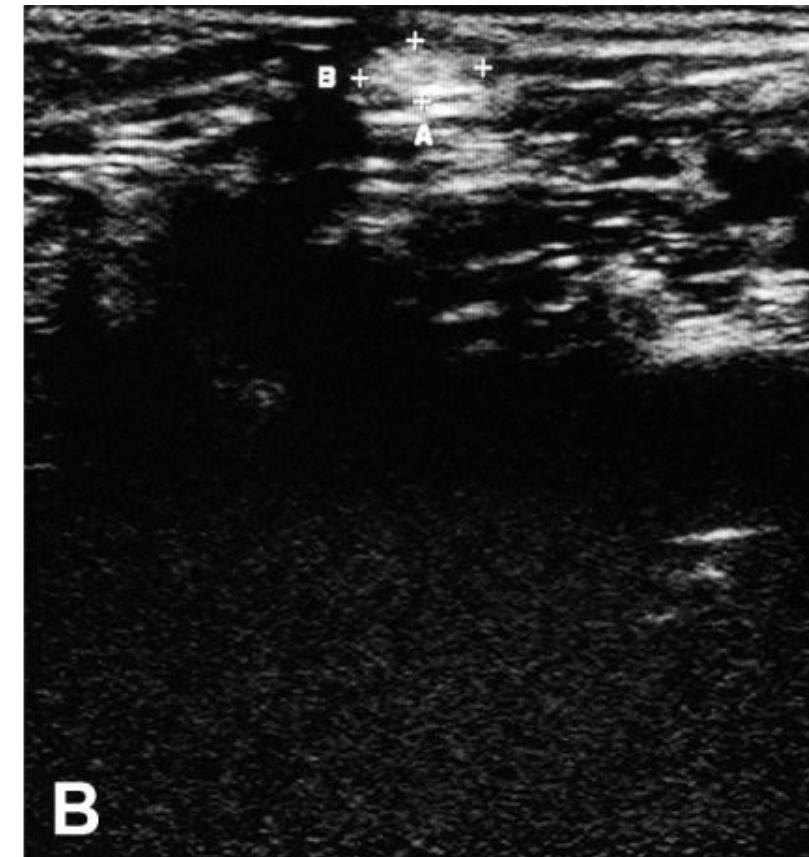
- Хорошая визуализация поверхностных сухожилий в медиальной области колена

Utility of preoperative ultrasound in assessing the adequacy of autograft for anterior cruciate ligament reconstruction: a systematic review and meta-analysis

Stephen Fucaloro¹, Gabriella Schreiner¹, Mark Ward¹, Laura Krivich², Jack Bragg², Matthew Harkey³, Matthew Salzler⁴

Affiliations + expand

PMID: 39730837 DOI: [10.1007/s00256-024-04860-8](https://doi.org/10.1007/s00256-024-04860-8)



УЗИ. Ограничения

- **Операторозависимость**
- **Ограниченный обзор:** сложно отследить сухожилие по всей длине
- **Вариабельность измерений:**
 - Положение конечности влияет на толщину сухожилий: Избыточное сгибание (90°) **искусственно увеличивает толщину**, создавая риск ошибки
 - Необходимо **всегда использовать одинаковый протокол измерений**

Вывод:

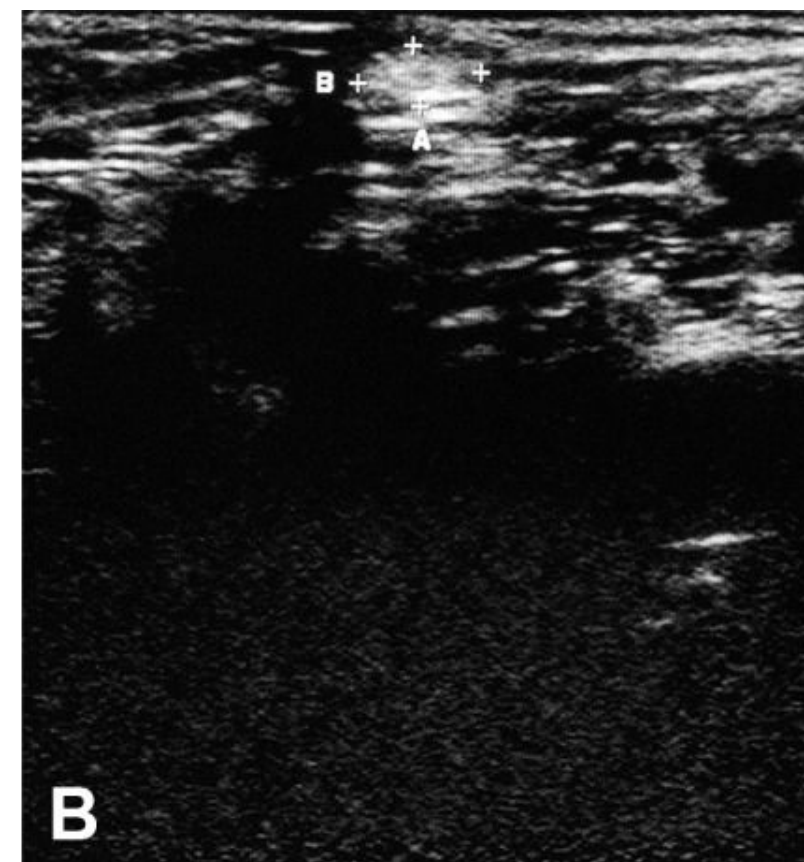
- **УЗИ может быть точнее МРТ при правильной методике**, но метод требует **опытного специалиста и стандартизации измерений**

Utility of preoperative ultrasound in assessing the adequacy of autograft for anterior cruciate ligament reconstruction: a systematic review and meta-analysis

Stephen Fucaloro¹, Gabriella Schreiner¹, Mark Ward¹, Laura Krivicich², Jack Bragg², Matthew Harkey³, Matthew Salzler⁴

Affiliations + expand

PMID: 39730837 DOI: [10.1007/s00256-024-04860-8](https://doi.org/10.1007/s00256-024-04860-8)



КТ- методики

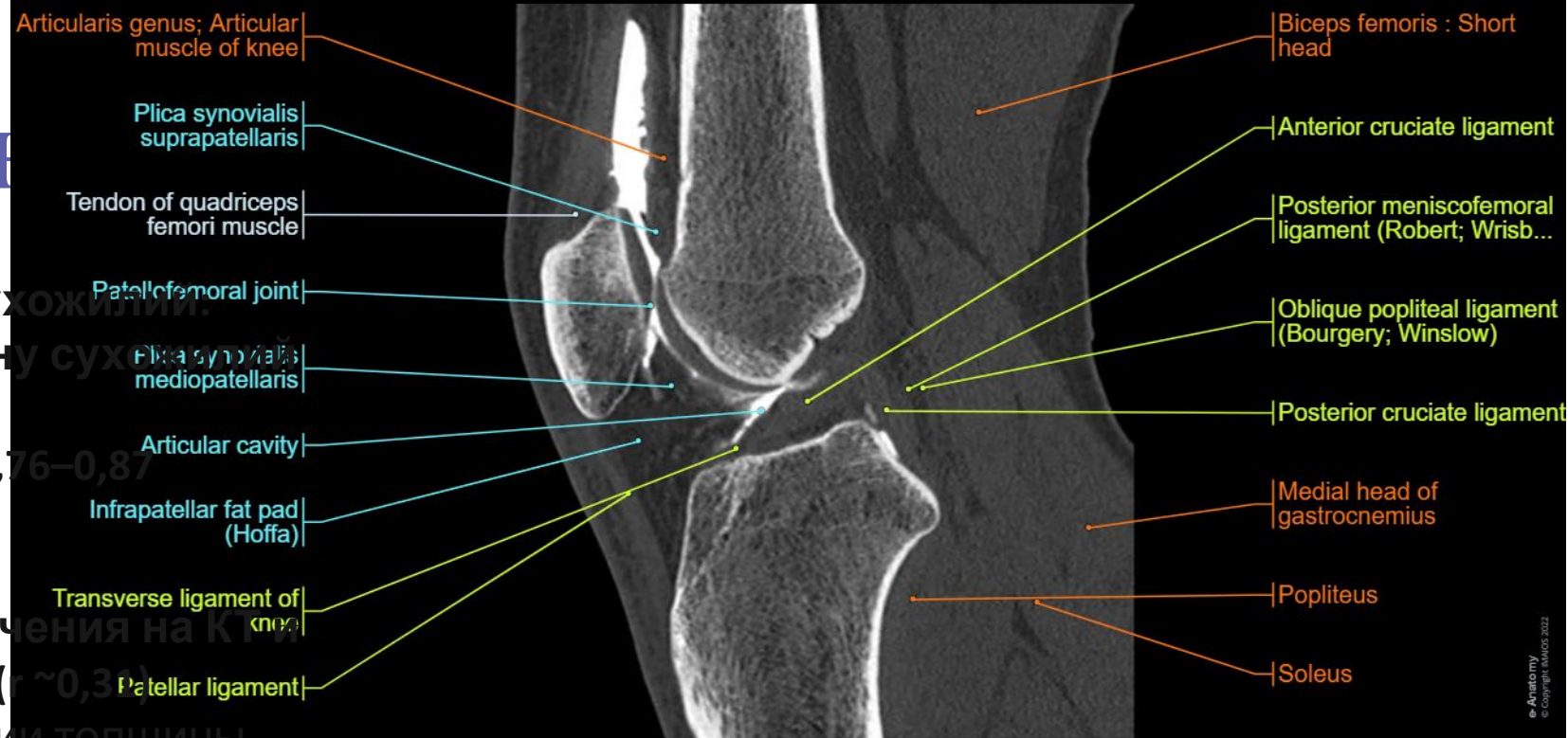
Точность в измерении длины сухожилий.

- 3D-КТ точно предсказывает длину сухожилий.
- Корреляция длины на КТ и интраоперационной длины: $r \sim 0,76-0,87$ ($p < 0,001$)

- Слабая корреляция площади сечения на КТ и фактического диаметра графта ($r \sim 0,36$)
- Уступает МРТ и УЗИ в предсказании толщины трансплантата

Преимущества КТ:

Высокое разрешение в 3D-реконструкции
Меньше зависит от опыта исследователя
Полезна, если МРТ недоступна



- Минусы и ограничения:

Лучевая нагрузка

Плохая визуализация мягких тканей

Ограниченное клиническое применение

Preoperative Determination of the Size of the Semitendinosus and Gracilis Tendon by Multidetector Row CT Scanner for Anterior Cruciate Ligament Reconstruction

Антропометрия

Размер ST-G сухожилий зависит от анатомических особенностей пациента:

- Женщины и люди невысокого роста чаще имеют тонкие сухожилия
- Высокий рост положительно коррелирует с длиной сухожилий

- Масса тела может влиять: у более тяжелых пациентов сухожилия могут быть длиннее

Этнические и генетические различия:

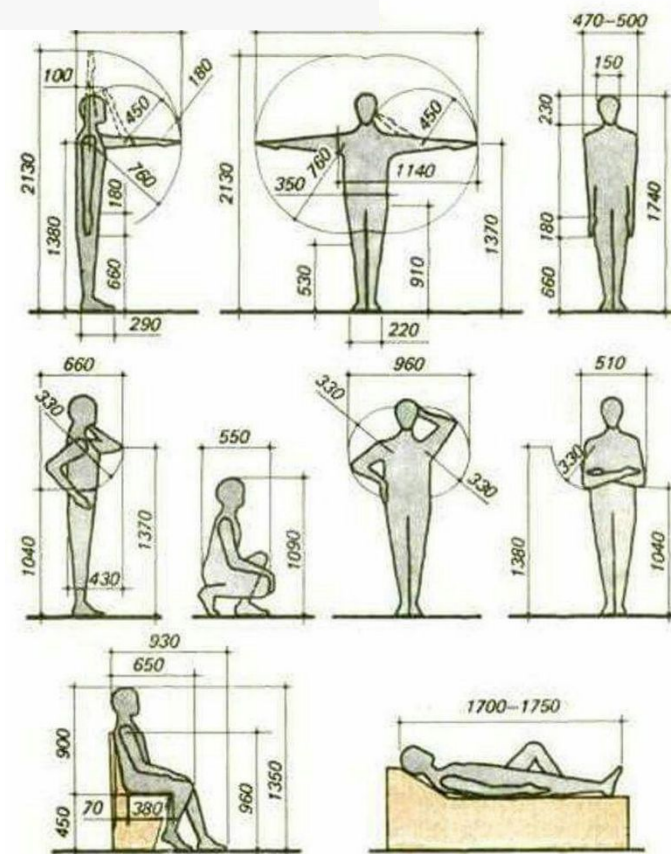
- В некоторых популяциях (например, у азиатских народностей) средний диаметр сухожилий **меньше**, чем у европеоидов
- Спортсмены и люди с развитой мускулатурой **могут иметь более толстые сухожилия**

Но! Корреляция антропометрии с диаметром трансплантата невысокая ($r \sim 0,3-0,5$) → Только по росту и весу точно предсказать диаметр графта невозможно

Comparing Ultrasound and MRI Evaluations of the Hamstring Tendon for Predicting Autograft Size in Anterior Cruciate Ligament Reconstruction

Preoperative Determination of the Size of the Semitendinosus and Gracilis Tendon by Multidetector Row CT Scanner for Anterior Cruciate Ligament Reconstruction

Predicting autologous hamstring graft diameter and finding reliable measurement levels in the Zhuang population using preoperative ultrasonography



Prediction of the Hamstring Graft Size for ACL Reconstruction Using Different Axial Layers in Preoperative MRI

[Moritz Florian Mayr](#)^{1,*}, [Markus Siegel](#)¹, [Elham Taghizadeh](#)², [Peter Obid](#)¹, [Hagen Schmal](#)^{1,3}, [Kaywan Izadpanah](#)¹

MPT

- Прекрасная визуализация мягких тканей
- Рутинное исследование при травмах ПКС.
- Площадь поперечного сечения статистически коррелирует с фактическим диаметром трансплантата, полученного на операции $r \approx 0,84$ ($p < 0,001$).

Результаты могут зависеть от качества аппарата и опыта врача



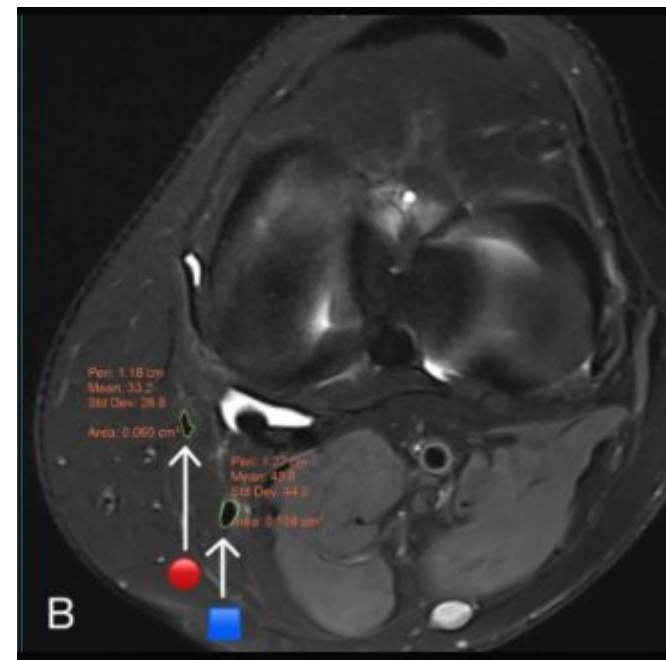
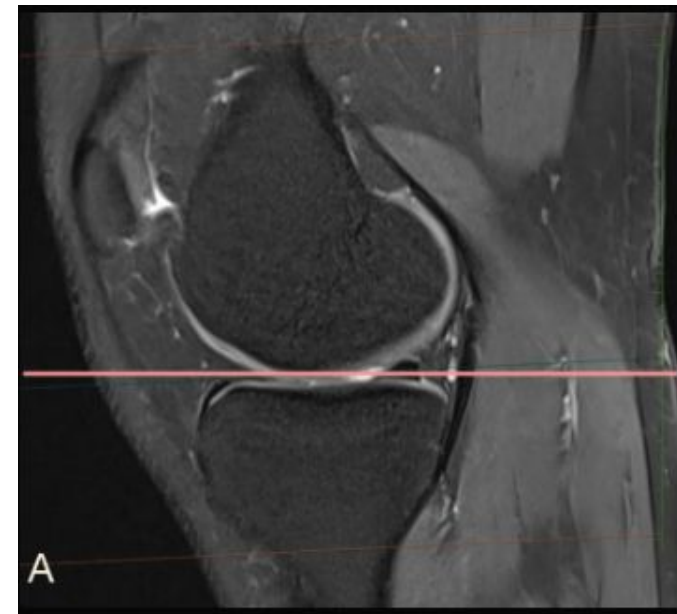
Стандартное МРТ 1.5 или 3 Тесла; Использование коленной катушки;
Разогнутое колено

МРТ - как измерять?

Сагиттальные и аксиальные томограммы в режиме PD или T2-взвешенных изображений (на аксиальных сечениях удобно определить площадь и форму сухожилия.)

Важным моментом является выбор уровня, на котором производятся измерения: сухожилия мышц (ST) и (GR) лучше всего визуализируются в дистальной трети бедра, и в pes anserinus.

Часто рекомендуется измерять на уровне суставной линии колена или немного выше



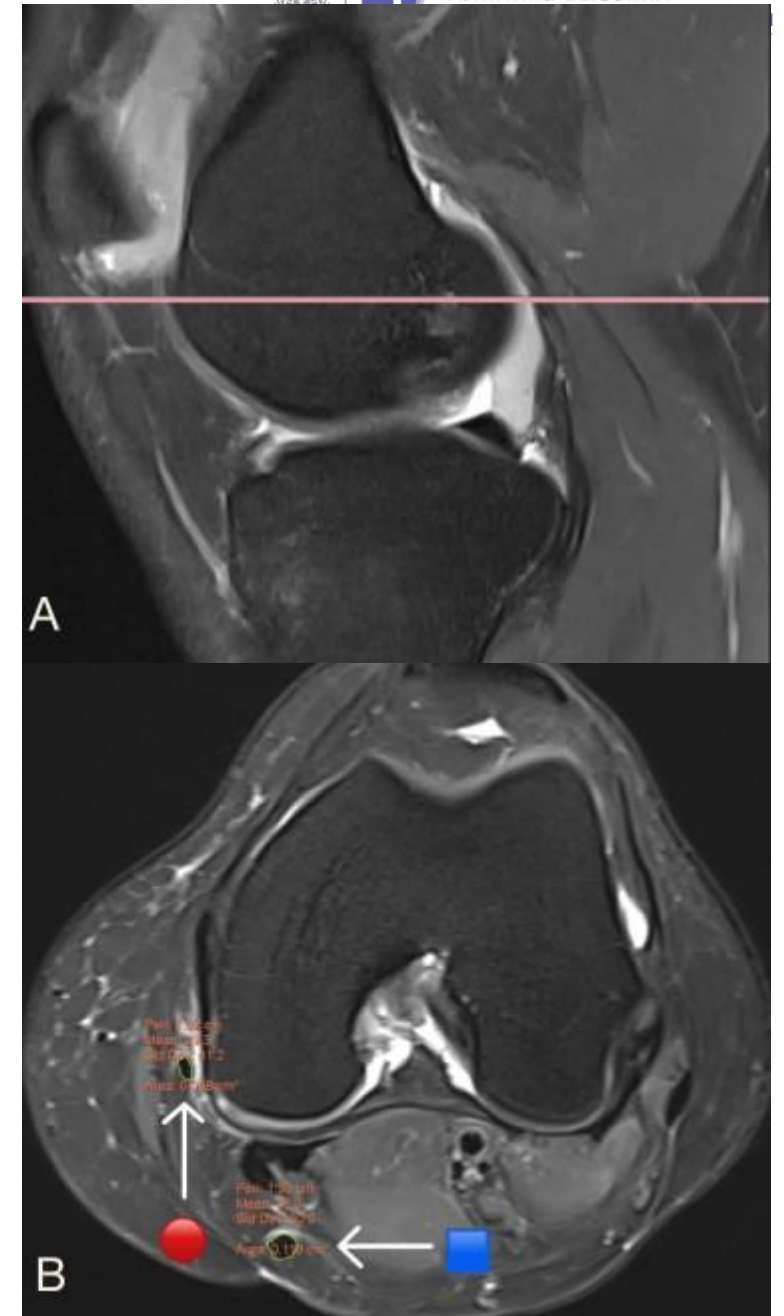
MPT- как измерять?

Наиболее точный уровень измерений на 10 мм выше суставной линии

► J Pers Med. 2024 May 29;14(6):582. doi: [10.3390/jpm14060582](https://doi.org/10.3390/jpm14060582)

Prediction of the Hamstring Graft Size for ACL Reconstruction Using Different Axial Layers in Preoperative MRI

[Moritz Florian Mayr](#)^{1,*}, [Markus Siegel](#)¹, [Elham Taghizadeh](#)², [Peter Obid](#)¹, [Hagen Schmal](#)^{1,3}, [Kaywan Izadpanah](#)¹



MPT- как измерять?

- 1) Провести планиметрию
- 2) Измерить либо **площадь поперечного сечения (CSA)** каждого сухожилия, либо их суммарную площадь (ST+GR), либо поперечник (диаметр) в миллиметрах, если сухожилие имеет близкую к округлой форму.

В публикациях чаще оперируют именно площадью поперечного сечения, так как два сухожилия могут иметь неидеально круглую форму.

После обведения контура программно вычисляется площадь в мм². Для повышения точности рекомендуется сильное увеличение изображения – вплоть до отображения пикселей – чтобы максимально точно очертить границы сухожилия



Примеры и нормативы:

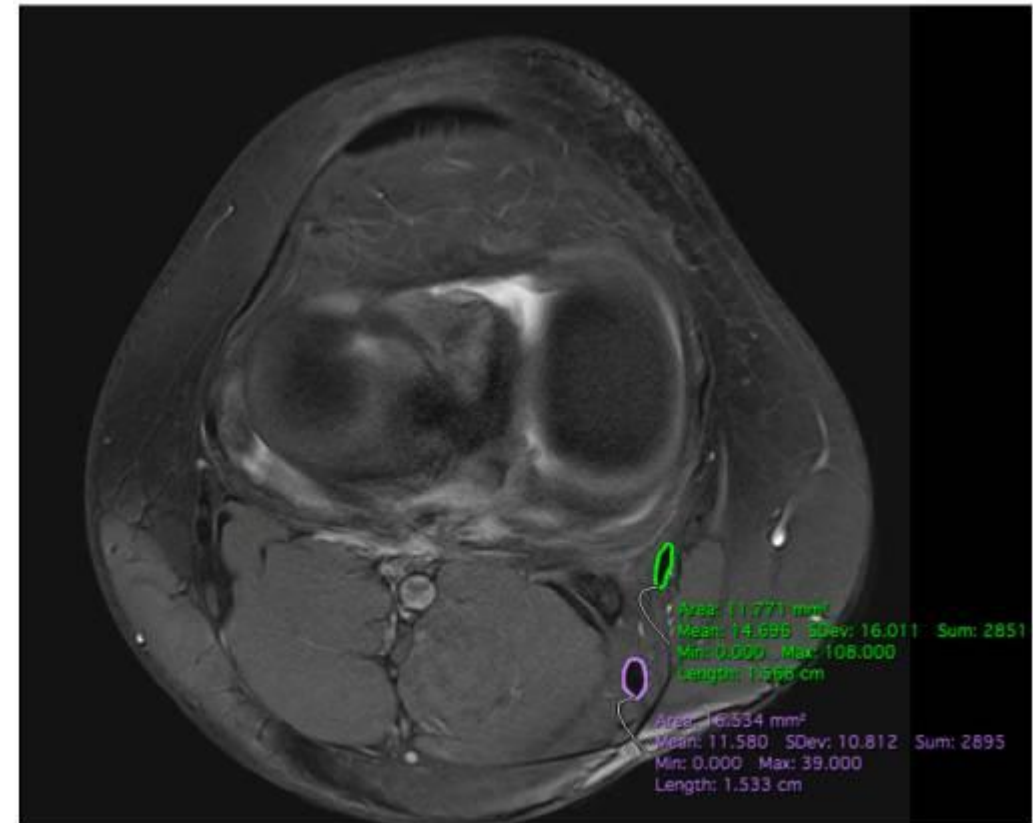
В норме CSA ST+GR у взрослого = 15–25 мм²

Минимальная суммарная CSA, необходимая для получения учетверенного трансплантата диаметром 8 мм, составляет ~17,5 мм².

CSA 20 мм² = Графт 10 мм

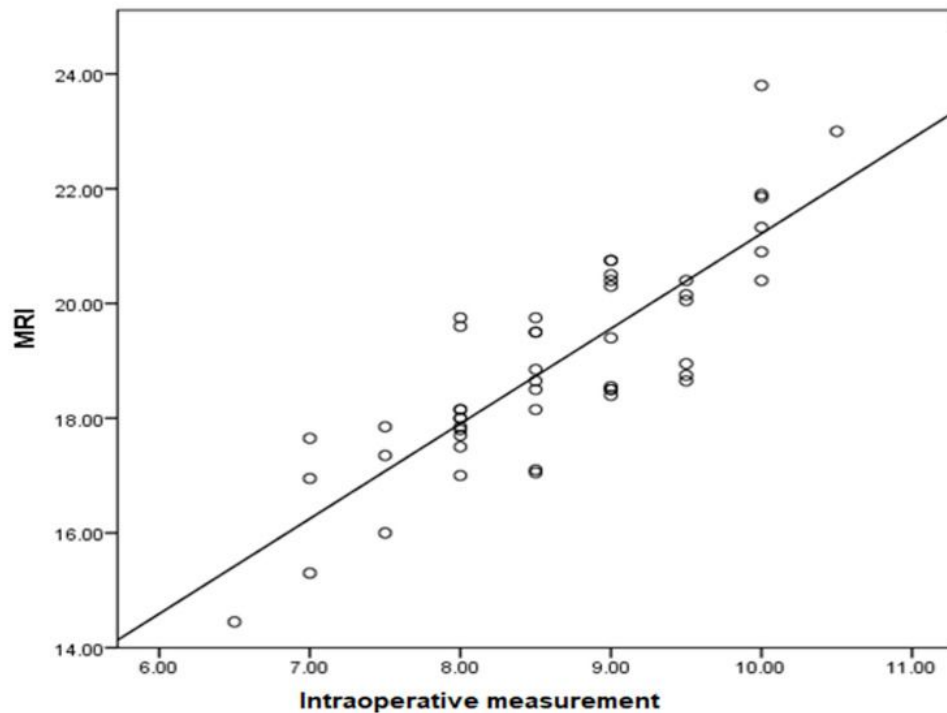
CSA <15 мм² = Графт <8 мм

В некоторых работах вместо площади измеряли **суммарный диаметр** двух сухожилий на аксиальных снимках – этот показатель ~17 мм также соответствует достижению графта ~8,3 мм. Оба подхода информативны.



MPT

На рисунке представлен график рассеяния
Ось X - фактический диаметр трансплантата (мм),
Ось Y – рассчитанная по MPT суммарная площадь сухожилий (мм²).



Положительная корреляция: при увеличении площади сухожилий на MPT (например, >20 мм²) диаметр графта почти всегда ≥8–9 мм

Тогда как при суммарной площади <15 мм² фактический графт, как правило, <8 мм.

Статистический анализ подтвердил высокую значимость этой корреляции ($r \approx 0,84$; $p < 0,001$).

Клиническое применение

Preoperative MRI Assessment of Hamstring Tendons to Predict the Quadruple Hamstring Graft Diameter in Anterior Cruciate Ligament Reconstruction

[Dhammapal S Bhamare](#)¹, [Saikishan Sirasala](#)^{1,✉}, [Purvam Jivrajani](#)¹, [Abhishek Nair](#)¹, [Shubham Taori](#)¹

- 10 / 68 пациентов
- МРТ диаметр хамстрингов (<7 мм)
- выполнена реконструкцию с QT графтом.

Thieme Medical Publishers 333 Seventh Avenue, New York, NY 10001, USA.

Can Preoperative Magnetic Resonance Imaging Predict Intraoperative Autograft Size for Anterior Cruciate Ligament Reconstruction? A Systematic Review

Suhail Agarwal , Darren de SA , Devin C. Peterson , Daniel Parmar , Nicole Simunovic , Rick Ogilvie , Volker Musahl , Olufemi R. Ayeni

- Введен алгоритм лечения для подростков, включающий МРТ.
- Если меньше 7 мм – квадрицепс.

Искажение результатов

Положение конечности

- Нужно стандартизировать угол колена (сейчас 10-15 градусов)

Качество оборудования: $7T\text{ MPT} > 3T > 1.5T > 0.35T$

- Толстые срезы или шум на изображении **снижают точность планиметрии**
- **Ручное обведение** сухожилий требует навыков
- Если измерять **выше или ниже стандартного уровня среза**, площадь может отличаться
- Атрофия, тендиноз, частичные разрывы могут **искажать реальный размер**
- Важно не только измерять диаметр, но и **оценивать структуру сухожилий**



Что мы сделали?

Александр



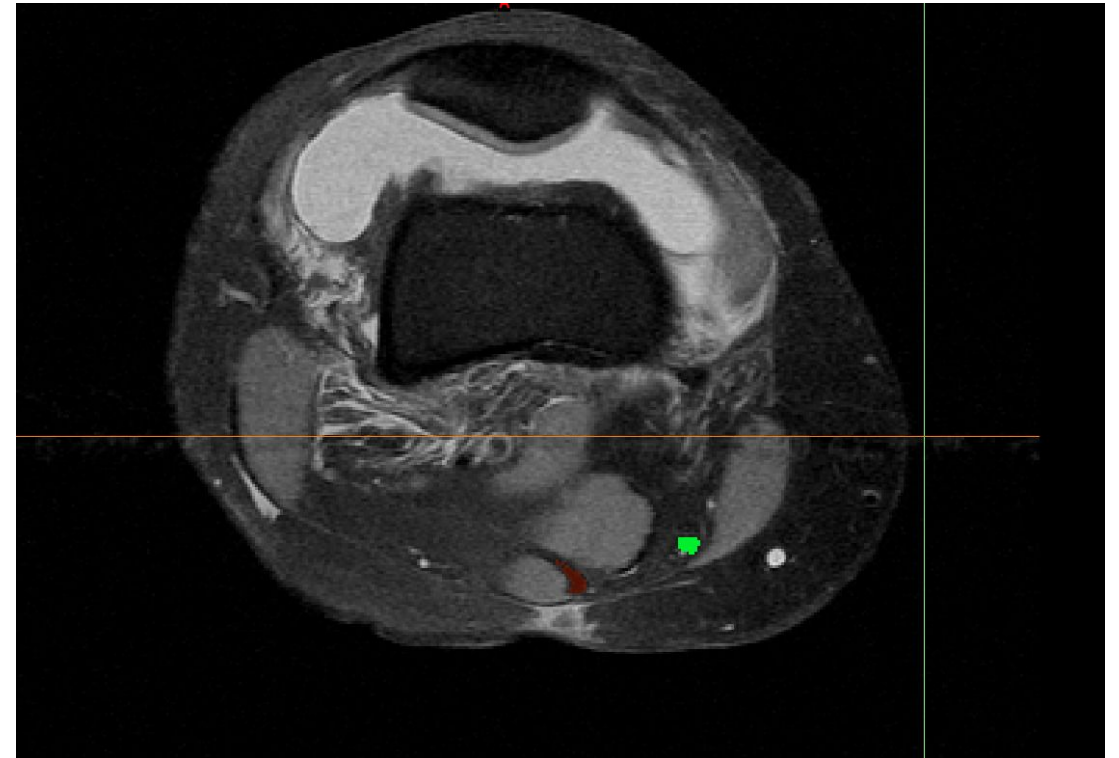
Измерял графты
интраоперационно,
отправлял Ивану МРТ
без комментариев

Иван



Измерял графты с
помощью сегментации

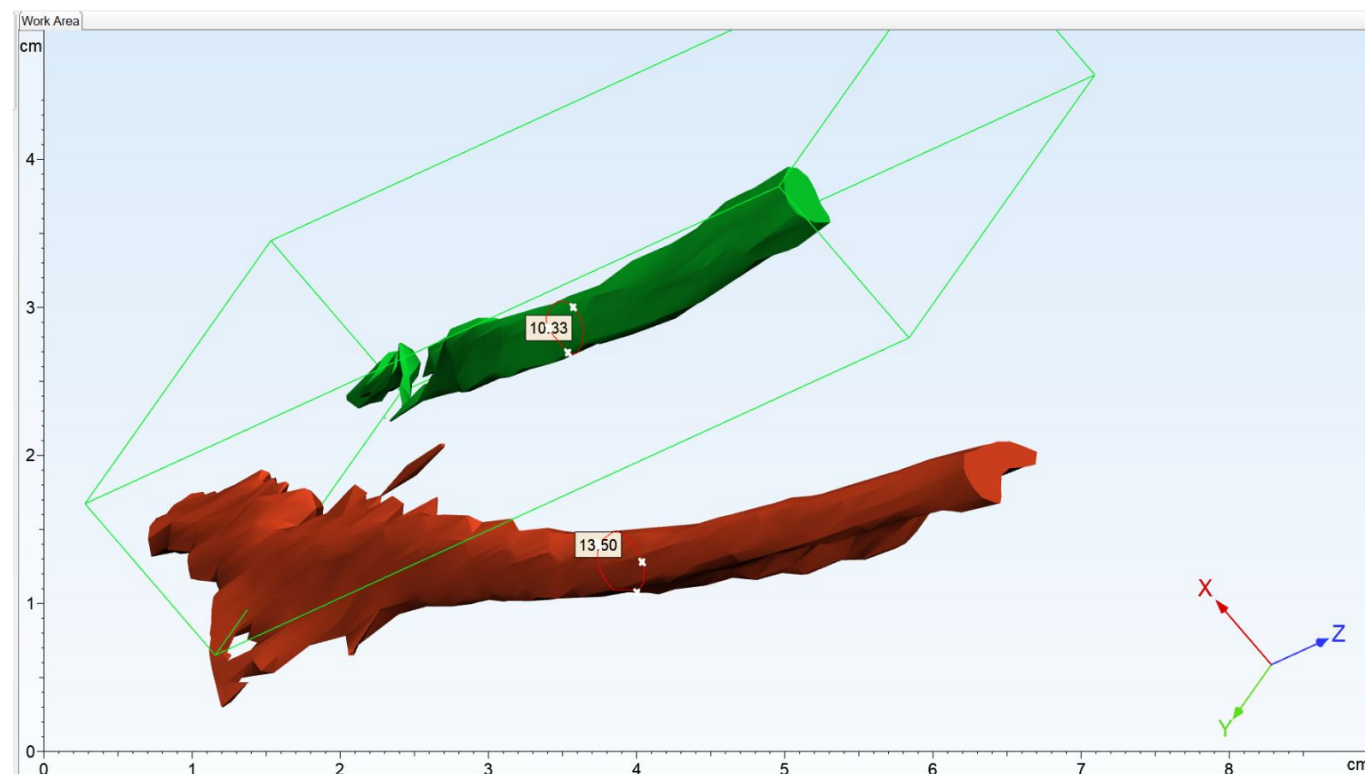
(Не знал диаметр
получившихся
сухожилий)



Результат сегментации 20 МРТ

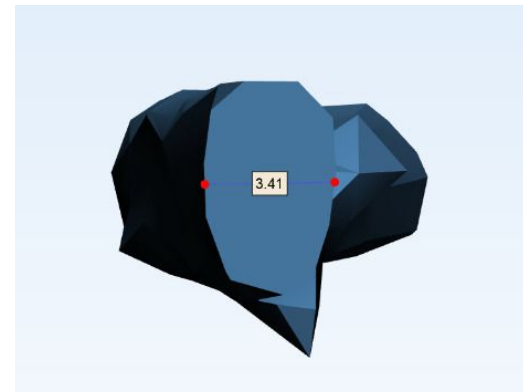
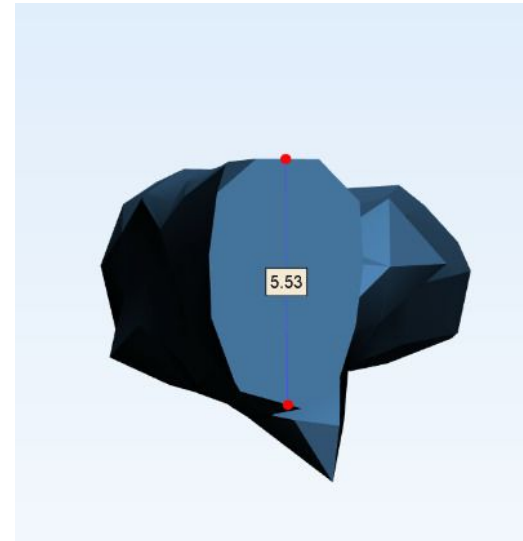
Среднее отклонение 0.2 мм

(возможно, это сила сжатия при
прохождении через стандартный
интраоперационный измеритель)



Методика расчета

1. Получение МРТ
2. Сегментация сухожилий
3. Вычисление площади поперечного сечения
4. Расчёт диаметра учетверённого трансплантата
5. Практическое применение



Расчет диаметра учетверенного трансплантата

- Если трансплантат формируют из четырёх пучков (по два от каждого сухожилия), то итоговая площадь поперечного сечения будет равна сумме площадей обоих сухожилий, умноженной на два (т.к. каждое сухожилие складывается вдвое).
- При известной площади A итогового поперечного сечения (в мм^2), приблизительный диаметр D трансплантата можно рассчитать по формуле площади круга:

$$A = \pi \times \left(\frac{D}{2}\right)^2 \quad D = 2\sqrt{\frac{A}{\pi}}$$



Методика расчета

1. Определение площадей отдельных сухожилий

«Тонкое» сухожилие (Gracilis)

1. Измеренная площадь поперечного сечения (ППС) одного пучка: **8,699 мм²**
2. При удвоении (поскольку это сухожилие складывается вдвое для трансплантата):
3. $8,699 \times 2 = 17,398 \text{ мм}^2$ $8,699 \times 2 = 17,398 \text{ мм}^2$

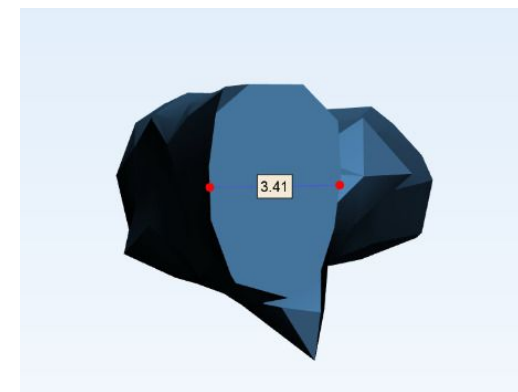
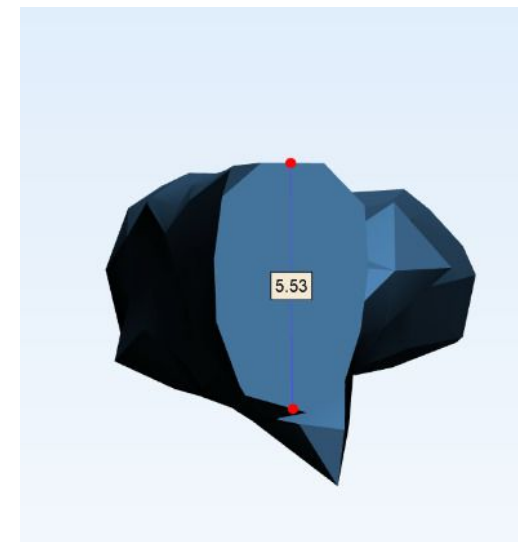
«Полусухожильное» (Semitendinosus)

4. Измеренная площадь одного пучка: **14,509 мм²**
5. Аналогично, при удвоении:
6. $14,509 \times 2 = 29,018 \text{ мм}^2$ $14,509 \times 2 = 29,018 \text{ мм}^2$

2. Суммарная площадь «учетверённого» трансплантата

Так как в классическом варианте трансплантат формируется из 4 пучков (по два от каждого сухожилия), мы просто складываем результаты:

$$17,398 + 29,018 = 46,416 \text{ мм}^2$$



Методика расчета

3. Перевод суммарной площади в эквивалентный диаметр (круг)

Важен именно **диаметр**: при формировании костного туннеля сверло выбирается по «круговому» сечению. Предполагаем, что наш суммарный объём пучков можно приблизительно моделировать **кругом** такой же площади:

$$D = 2\sqrt{\frac{A}{\pi}}$$

Подставляем $A = 46,414 \text{ мм}^2$:

1. Делим на π :

$$\frac{46,414}{\pi} \approx \frac{46,414}{3,14159} \approx 14,775$$

2. Извлекаем корень:

$$\sqrt{14,775} \approx 3,845$$

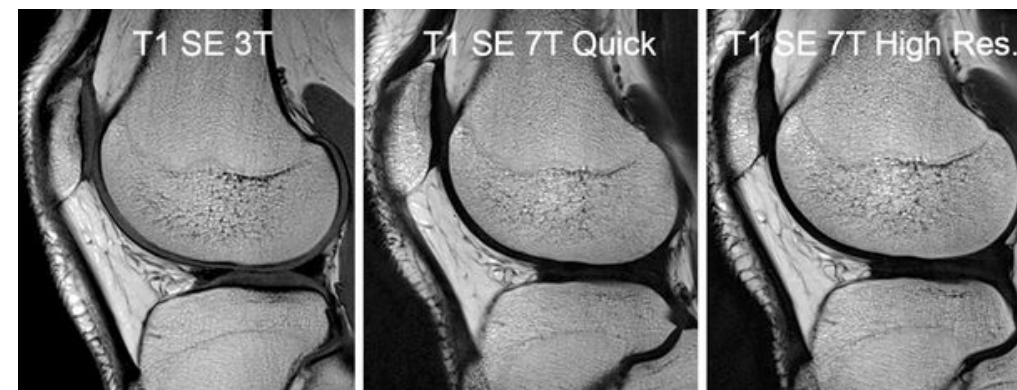
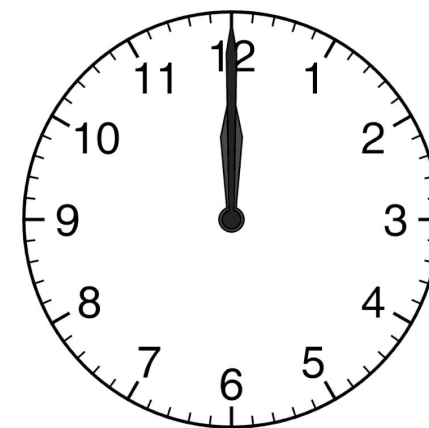
3. Умножаем на 2:

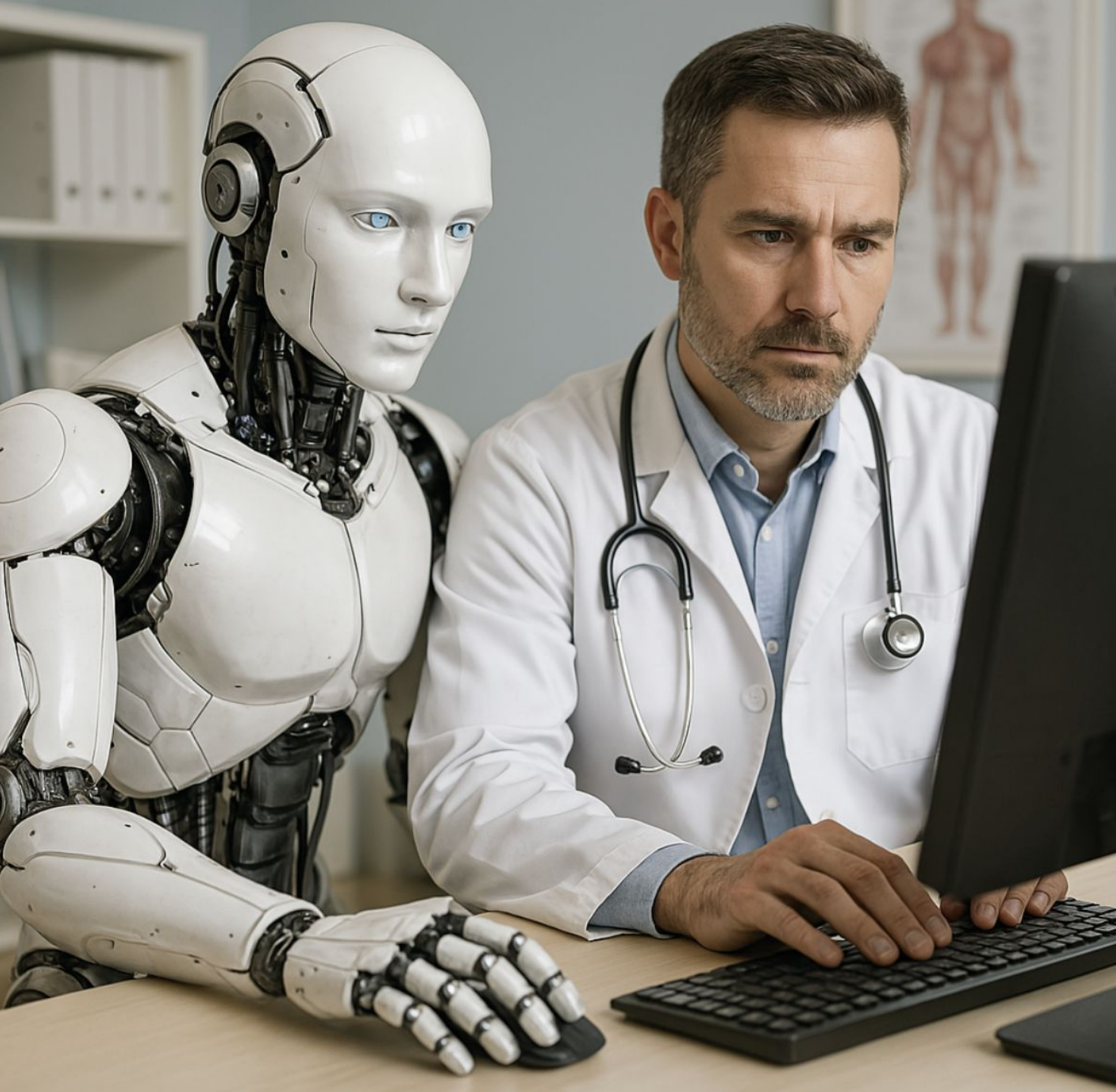
$$D \approx 3,845 \times 2 = 7,69 \text{ мм}$$

Именно **7,69 мм** (примерно **7,69–7,70 мм**) мы и получаем как расчётный диаметр условно круглого «учетверённого» трансплантата.

Проблемы наших расчетов

- Первые 2 сегментации заняли 90 минут = невозможно использовать как предоперационное планирование
- Сейчас около 10-15 минут
- Проводились измерения только на 1.5 Т исследованиях
- Не сравнивали с другими методами самостоятельно





Решение проблем

- После проведения 15 сегментаций, возможно создать автоматический альбом, который сократит время исследования до 5 минут.
- Более мощные МРТ аппараты повышают точность измерений.
- Проведение сравнительного исследования совместно с другими методиками измерений необходимо.

Клинический случай – неожиданно тонкий трансплантат

- Во время операции по реконструкции ПКС у 20-летнего пациента было забрано сухожилия хамстринг(ST-G).
- Диаметр графта составил 6,5 мм.
- Что делать в такой ситуации?
- **Использовать трансплантат, несмотря на малый диаметр?**
- **Попытаться увеличить толщину графта? Если да, как?**



Выводы

- На сегодняшний день не существует ни одного предоперационного метода, который достоверно позволяет предсказать диаметр сухожилий Hamstring
- УЗИ, МРТ хорошо предсказывают по бинарной логике (трансплантат более или менее 8 мм) при наличии обученного оператора
- Антропометрические методы изолированно не имеют предсказательной мощности (хорошо дополняют МРТ и УЗИ методику)
- Сегментация сухожилий наиболее близка к отражению реального диаметра сухожилий. Необходимо разработать стандартную методику
- Сегментация сухожилий нивелирует перегиб сухожилий при сгибании колена.



СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!