

УДК 616.728.3:616.758]-089.844(045)

DOI: <http://dx.doi.org/10.15674/0030-59872025243-51>

Критичні параметри розташування каналів під час пластики передньої схрещеної зв'язки: ретроспективний МРТ-аналіз

О. О. Коструб¹, П. В. Дідух¹, І. М. Нікіфорова²,
І. А. Засаднюк¹, Р. І. Блонський¹, В. А. Подік¹

¹ ДУ «Інститут травматології та ортопедії НАМН України», Київ

² Діагностичний центр М24, Київ, Україна

Anterior cruciate ligament (ACL) rupture is one of the most common knee injuries requiring surgical intervention. The increasing number of revision surgeries indicates the potential presence of technical errors during primary reconstruction, emphasizing the importance of outcome analysis and careful surgical planning. MRI remains the gold standard not only for diagnosing ACL injuries and associated lesions, but also for evaluating postoperative changes. Objective. To assess MRI-based measurements of femoral and tibial tunnel inclination and entry point location as potential technical causes of ACL graft failure. Methods. A retrospective analysis was conducted on 105 knee MRI scans from patients following primary ACL reconstruction. The parameters evaluated included femoral and tibial tunnel inclination angles on coronal views, femoral tunnel entry point using a modified Bernhard and Hertel method, and tibial tunnel entry point assessed via the Amis and Jacob line. Results. A femoral tunnel angle within the 30°–50° range was found in 63 % of cases, with the optimal range of 32°–39° observed in 21 %. In 16 % of cases, the angle exceeded 50°, and in 3 % it was less than 17°. The femoral tunnel entry point fell within the normal range in 46 % of cases, while in 42 cases it was located outside the defined measurement rectangle. Tibial tunnel position on sagittal projection was anatomically correct in 38 % of cases, anteriorly displaced in 21 %, and posteriorly displaced in 41 %. The optimal tibial tunnel inclination angle ($\geq 65^\circ$) was found in 61 % of cases. Graft integrity was preserved in 24 % of cases with posterior tibial tunnel positioning, and in only 6 % with anterior placement. Conclusions. Technical errors in tunnel formation are a common cause of ACL graft failure. Accurate determination of the tunnel entry point is the most critical factor, while tunnel angle plays a secondary, yet diagnostically valuable, role. These findings highlight the need for meticulous planning, including the use of MRI and intraoperative navigation techniques to optimize tunnel placement. Keywords. Anterior cruciate ligament (ACL), MRI, bone tunnels, graft.

Розрив передньої схрещеної зв'язки (ПСЗ) — одна з найпоширеніших травм колінного суглоба. Зростання кількості ревізійних операцій свідчить про можливі технічні помилки під час первинної реконструкції, що актуалізує необхідність аналізу результатів і ретельного планування. Магнітно-резонансна томографія (МРТ) є «золотим стандартом» у діагностиці як розривів ПСЗ, так і супутніх ушкоджень, а також ефективним інструментом для вивчення післяопераційних змін. Мета. Оцінити показники нахилу та розташування феморального та тибіального каналів за допомогою МРТ для виявлення можливих технічних причин ушкодження трансплантата ПСЗ. Методи. Проведено ретроспективний аналіз 105 МРТ обстежень колінного суглоба в пацієнтів після первинної пластики ПСЗ. Вимірювались: кут нахилу феморального і тибіального каналів у коронарній проєкції, положення точки входу феморального каналу. Результати. Кут нахилу стегнового каналу в межах 30°–50° виявлено у 63 % випадків, оптимальні 32°–39° — у 21 %. У 16 % пацієнтів він перевищував 50°, у 3 — менше 17°. Точка входу феморального каналу відповідала нормі в 46 % осіб, у 42 випадках спостерігалось розташування феморального каналу поза межами вимірюваного прямокутника. Положення тибіального каналу на сагітальній проєкції зберігало анатомічну межу в 38 % обстежень; у 21 він був зміщений дореду, у 41 — дозад. Кут нахилу тибіального каналу був оптимальним ($\geq 65^\circ$) у 61 % випадків. За заднього розташування каналу трансплантат зберігався у 24 % випадків, за переднього — у 6. Висновки. Поширеність технічних помилок під час формування кісткових каналів може бути причиною ушкодження трансплантата. Найкритичнішим є правильне визначення точки входу каналів, тоді як кут нахилу відіграє другорядну роль, проте є маркером технічної похибки. Результати підкреслюють необхідність ретельного планування, зокрема з використанням МРТ і додаткових методик навігації під час операції.

Ключові слова. Передня схрещена зв'язка, МРТ, кісткові канали, трансплантат

Вступ

Розрив передньої схрещеної зв'язки (ПСЗ) — найчастіша травма зв'язок у колінному суглобі. Річна захворюваність лише в Сполучених Штатах становить приблизно 1 на 3 500 осіб і потребує 400 000 реконструкцій ПСЗ щорічно [1]. Інформація обмежена відсутністю будь-якого стандартного механізму епідеміологічного нагляду за загальним населенням і може бути не точною. Загалом наявні дані свідчать про те, що часто-та розривів ПСЗ зростає в пацієнтів різного віку протягом останніх десятиліть [2–10]. Відповідно збільшується й частота ревізійних реконструкцій [11]. Хоча літературні джерела не є однотайними щодо здатності реконструкції ПСЗ попередити посттравматичний остеоартроз (ОА), проте деякі дослідження знаходять докази кращої стабільності та запобігання подальшого ураження менісків і хряща після реконструкції ПСЗ [12–14]. Частота ревізійної реконструкції ПСЗ (РРПСЗ) коливається від 6–12 % за твердженням одних авторів [15] і до 20–25 % [16, 17] інших.

РРПСЗ призводить до гірших функціональних результатів ніж первинна (ПРПСЗ) [18]. Серед додаткових проблем пов'язаних із ревізією — подовження часу відновлення, триваліша втрата працездатності та більші економічні витрати, особливо в разі 2-етапних ревізій. Саме тому постає важливим питання планування ревізійної реконструкції та можливості проведення одностайної ревізії, бо ця техніка приводить до кращих результатів [19–21].

За травм ПСЗ візуалізація за допомогою магнітно-резонансної томографії (МРТ) є якісним інструментом для підтвердження ушкодження та діагностики супутніх травм. Проте МРТ також корисне для встановлення постопераційних змін після проведеної раніше ПРПСЗ і подальшого планування РРПСЗ.

Мета: визначити основні показники, які можна виявити на магнітно-резонансній томографії для планування подальшої тактики лікування в пацієнтів з ушкодженням трансплантата, також проаналізувати технічні чинники, які призводять до його ушкодження.

Матеріал і методи

Проаналізовано результати МРТ-досліджень у пацієнтів із проведеною раніше ПРПСЗ. Обстеження здійснено на базі «Діагностичний центр М24», м. Київ із 2014 по 2024 р. Дослідження виконано з дотриманням етичних принципів,

включаючи положення Гельсинської декларації (2000 р.) та відповідного законодавства України.

Робота базується виключно на анонімізованих МРТ-даних, отриманих із дотриманням етичних вимог і без можливості ідентифікації осіб. Усього було вивчено 105 МРТ-обстежень пацієнтів із виконаною первинною реконструкцією ПСЗ і незадовільним, за даними МРТ, результатом із точки зору інтеграції трансплантата. Вік хворих становив (36 ± 1) років. До протоколу дослідження входили МРТ-знімки, а також висновки МРТ-обстеження. Вимірювались: кут нахилу феморального і тібіального каналів у коронарній проекції, положення точки входу феморального каналу за адаптованим методом Bernhard and Hertel, точка входу тібіального каналу за лінією Amis і Jacob. Усі обрахунки проводились за допомогою програмного забезпечення для перегляду МРТ-знімків (RadiAnt DICOM Viewer). Вимірювання заносились до таблиці Excel, після чого здійснювали статистичний аналіз даних. Додатково визначались кут нахилу латерального плато, площа ямки стегнової кістки, міграція та неспроможність фіксаторів, супутні ушкодження менісків.

Коронарна проекція, кут нахилу стегнового каналу

За анатомічної однопучкової реконструкції ПСЗ, феморальний тунель повинен бути розташований у місці кріплення нативної ПСЗ. Коректне розташування точки входу тунелю та його нахил мають принципове значення для кращого клінічного результату. Оптимальним вважається кут нахилу на прямій проекції в різних джерелах близько 32° – 39° [22, 23]. Він забезпечує достатню довжину каналу для фіксації зв'язки, проте кут менше 32° також прийнятний. Але потрібно пам'ятати — чим довший канал, тим більша ймовірність його розширення після операції, що може привести до нестабільності трансплантата та його інтеграції. Також кут нахилу каналу опосередковано може вказувати на невірно визначену точку входу. Кут менше 17° може спричинити вертикалізацію зв'язки та відповідно нестабільність. Занадто гострий кут може призвести до недостатньої довжини каналу для фіксації зв'язки. Вимірювання виконувалося на коронарній проекції, на зрізі з найоптимальнішою візуалізацією каналу, між лінією, яка була проведена через середину діафізу стегнової кістки та лінією, проведеною через феморальний тунель.

Діапазон від 30° до 50° можна вважати хорошим результатом. У проведеному дослідженні

кут нахилу стегнового каналу в діапазоні від 30° до 50° був у 63 % обстежених. У 37 % кут нахилу стегнового каналу був поза межами оптимального діапазону. У таблиці 1 наведено кути та відсоткове співвідношення серед 105 МРТ-обстежень.

Точка входу стегнового каналу на сагітальній проєкції

За умов анатомічної однопучкової пластики зв'язки місце входу стегнового каналу повинно розташовуватись у місці кріплення нативної ПСЗ. Для визначення правильності його розташування найчастіше застосовують метод Bernhard and Hertel, за якого на рентгенівський або знімок комп'ютерної томографії наноситься прямокутник із сіткою. Основною лінією, яка його формує, є лінія Блюменсаата, дотична до даху міжвиросткової ямки. Далі до цієї лінії утворюємо паралельну дотичну нижнього краю латерального виростка. Після чого проводиться перпендикуляр до попередніх двох ліній по задньому краю латерального виростка та перпендикуляр по передньому його краю. Отриманий прямокутник оцінюють за двома напрямками — задньо-передньому та верхньо-нижньому і розділяють рівномірно сіткою 5 × 10 мм. Оптимальним розташуванням у задньо-передньому напрямі вважається 27 %, у верхньо-нижньому — 34 % [24, 25].

У нашому дослідженні ми адаптували метод Bernhard and Hertel для МРТ-знімків і вимірювали відстані в мм та проводили вирахування у відсотках шляхом складання стандартної пропорції. Для візуалізації точки входу були співставлені коронарна, сагітальна та аксіальна проєкції.

У разі виконання анатомічної однопучкової пластики ПСЗ, трансплантат повинен забезпечувати передньо-задню та ротаційну стабільність. Тому розташування точки входу стегнового каналу є надзвичайно важливим, адже відхилення від анатомічного може призводити до нестабільності в певному діапазоні рухів, обмеження рухів та ушкодження трансплантата. Оптимальним розташуванням раніше вважалось 24 % в задньо-передньому напрямі та 28 у верхньо-нижньому [24]. Проте в останніх анатомічних дослідженнях

середнім значенням вважається 27 % для задньо-переднього та 34 % для верхньо-нижнього напрямку [24, 25]. У спостереженні, урахувавши похибку, прийнято оптимальний діапазон у 20–30 % для задньо-переднього напрямку та 28–38 % для верхньо-нижнього.

У 42 випадках хоча б один показник дорівнював 0, тобто виходив за межі прямокутника та становить 44 % від загальної кількості. У 25 % осіб у задньо-передньому напрямку розташування каналу було в межах 20–30 %, у верхньо-нижньому — в 34 % пацієнтів на рівні 28–38 %. Проте лише у 44-х випадках розташування каналу в обох напрямках відповідало оптимальним межах, що дорівнює 46 % (табл. 2).

Розміщення точки входу феморального каналу є критично важливим кроком для успішного проведення реконструкції ПСЗ, адже значна похибка може призвести до негативного результату.

Положення тібіального тунелю на сагітальній проєкції

Розташування гомілкового тунелю на сагітальній проєкції повинне бути локалізоване за лінією Блюменсаата. Найчастіше застосованим методом вимірювання його позиції є лінія Amis і Jacob, яка проходить через найширшу частину заднього кута медіального великогомілкового плато, паралельно медіальній лінії суглоба [24]. Центр тунелю в ідеалі повинен бути розташований в 43 % від усієї сагітальної відстані плато великогомілкової кістки, вимірної від переднього краю великогомілкової. МРТ-вимірювання нативної ПСЗ коливаються від 27 до 60 % в одних дослідженнях [24, 26] та від 28 до 63 % в інших [27].

Для вимірювання розташування точки входу тібіального каналу вибирається проєкція, на якій канал найкраще видно та проводиться лінія Amis і Jacob. Першою визначають відстань від переднього краю великогомілкової кістки до переднього краю тунелю. Далі виконуємо ті самі дії для середини тунелю і його заднього краю. Дані оцінюємо у відсотках шляхом складання пропорцій.

Серед усіх пацієнтів тібіальний канал був розташований в передній точці менше ніж на 28 % у 21 % випадків. Цей показник може свідчити про те, що у цих осіб розташування великогомілкового каналу за лінією Блюменсаата. Воно призводить до імпіджменту з дахом міжвиросткової ямки та розвитку «циклоп-синдрому». У 19 пацієнтів із 20 зруйновано трансплантат ПСЗ, і в 1 випадку ознаки «циклоп-синдрому» й ушкодження трансплантата.

Таблиця 1
Кут нахилу феморального каналу
на коронарній проєкції

Кут нахилу (референтні значення) (°)	≤ 17	17–32	32–39	39–50	≥ 50
К-сть обстежень (%)	3	30	21	30	16

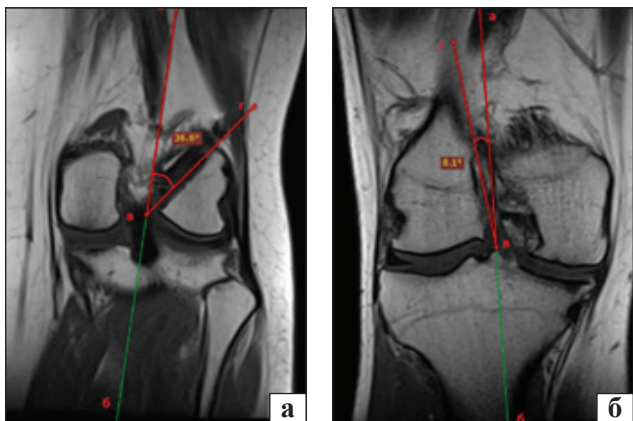


Рис. 1. Вимірювання кута нахилу стегнового каналу на коронарній проекції: а) кут оптимальний і дорівнює 36,6°; б) кут надто вертикальний і дорівнює 8,1°. Лінія а–б проведена через середину діафізу стегнової кістки; лінія в–г проведена через феморальний канал; авг — кут нахилу каналу

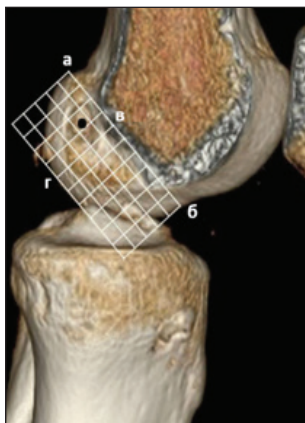


Рис. 2. Метод Bernhard and Hertel, сітка 5 x 10 мм на КТ-зображенні для визначення точки входу стегнового каналу. Відстань а–б — задньо-передній напрям; в–г — верхньо-нижній; чорна позначка — точка входу стегнового каналу, яка знаходиться приблизно в 30 % в задньо-передньому напрямку та 27 у верхньо-нижньому

У 39 осіб розташування каналу в задній його точці було більше ніж 63 %, якщо він знаходиться занадто дозадю плато, може призвести до ротаційної нестабільності колінного суглоба (табл. 3).

Вимірювання відстані точки входу тібіального каналу

На рис. 6 канал розташований у передній точці в 59 % та в задній в 73 %. Показники свідчать про занадто заднє розташування каналу та вертикальне трансплантата.

Вимірювання нахилу великогомілкового каналу в коронарній проекції

Кут нахилу тібіального каналу є принциповим для транстібіальної техніки пластики передньої схрещеної зв'язки і повинен бути в межах 65°–70° [28]. Для анатомічної техніки пластики ПСЗ він не такий принциповий, адже від нього не залежить проведення стегнового каналу. Проте, якщо кут нахилу буде замалим через анатомічні особливості плато великогомілкової кістки, довжина каналу може бути занадто короткою. Недостатня довжина каналу може ускладнити фіксацію трансплантата, особливо це стосується інтерферентних гвинтів, а також невірному розміщенню точки входу каналу. Чим гостріший кут, тим овальнішою, а не круглою буде точка виходу, адже існує пряма залежність від кута нахилу до форми виходу тібіального каналу [29]. У таблиці 4 показано залежність діаметра точки входу каналу від кута нахилу.

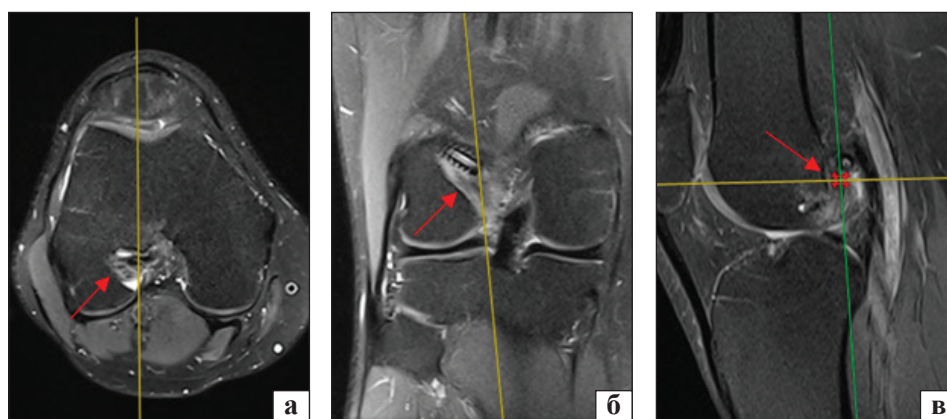


Рис. 3. Співставлення проекцій для визначення точки входу стегнового каналу. а — аксіальна: стрілкою вказано де візуалізується феморальний канал у крайньому зрізі, лінія проекції сагітального зрізу; б — коронарна: стрілкою вказано візуалізацію феморального каналу в крайньому зрізі, лінія проекції сагітального зрізу; в — сагітальна, стрілкою вказано на коло, точка входу стегнового каналу, яка знаходиться на перетині ліній коронарної й аксіальної проекцій

Таблиця 2

Дані вимірювання точки входу феморального каналу за адаптованою для МРТ методикою Bernhard and Hertel

Напрям	Задньо-передній				Верхньо-нижній			
Референтні значення (%)	0	< 20	20–30	> 30	0	< 28	28–38	> 38
К-сть обстежень (%)	11	4	25	60	34	19	34	13

Якщо місце виходу тибіального каналу буде овальним, це може призвести до розширення каналу та недостатнього прилягання трансплантата, що ускладнить його інтеграцію. Згідно з дослідженнями, найправильнішим кутом нахилу каналу є $\geq 65^\circ$ [30–34].

Кут нахилу великогомілкового каналу вимірювався наступним чином: обиралась проєкція, де найкраще візуалізується початок каналу в колінному суглобі та його довжина, проводилась лінія паралельна плато великогомілкової кістки, до лінії плато утворювали лінію по ходу тибіального каналу, вимірювали кут між цими двома лініями. Якщо відстань була недостатньою для вірного вимірювання кута, лінія по ходу каналу виставлялась проєкційно. Із 105 МРТ-досліджень у 61 % випадків — кут нахилу $\geq 65^\circ$ (прийнято за оптимальний), у 39 — $< 65^\circ$.

Результати

У 63 % випадків кут нахилу стегового каналу на коронарній проєкції перебував у прийнятному діапазоні 30° – 50° , причому найоптимальніші значення (32° – 39°) спостерігалися у 21 %. У 3 % випадків кут менший за критичний (менше 17°), тоді як у 16 % — перевищував 50° . Точка входу феморального каналу відповідала оптимальним межах у 46 % обстежень, тоді як у 42 випадках вона виходила за межі прямокутника на сагітальній проєкції.

Щодо тибіального каналу, його положення на сагітальній проєкції відповідало анатомічним межах у 38 % випадків, у 21 він був зміщений до переду, а в 41 — до задку. За заднього розташування

трансплантат зберігався у 24 % обстежень, а переднього — лише у 6 %. Кут нахилу тибіального каналу на коронарній проєкції перебував у межах норми у 61 % досліджень.

Отримані результати свідчать про поширені технічні відхилення під час формування каналів за пластики ПСЗ, що може впливати на успішність інтеграції трансплантата.

Обговорення

Результати нашого дослідження підтверджують важливу роль точного формування феморального та тибіального каналів під час пластики ПСЗ. Зокрема, виявлено відхилення в кутах нахилу та розташуванні точок входу можуть прямо впливати на стабільність трансплантата й успішність інтеграції.

Подібні до наших значення вказані в роботах K. D. Illingworth і співавт. та A. P. Parkar і співавт., які зазначають, що оптимальним є кут 35° – 45° , який запобігає надмірній вертикалізації зв'язки та нестабільності суглоба [22, 34, 35].

J. P. Rue і співавт. також підтверджують негативний вплив кутів $< 25^\circ$ на клінічні результати [33]. Таким чином, наші дані узгоджуються з наведеними і демонструють значну частоту технічних похибок у формуванні каналу.

Точка входу стегового каналу лише у 46 % розташована в межах оптимальних анатомічних орієнтирів. Подібні результати отримали S. K. Nema і співавт., які виявили, що лише 35 % стегових каналів були правильно позиціоновані, що спричинювало імпіджмент трансплантата в 34 % пацієнтів [36].

Наше дослідження показало, що точка входу тибіального каналу лише в 38 % відповідала анатомічним межах на сагітальній проєкції. Це співпадає з даними M. Sharma і співавт., які виявили, що неправильне розташування цього каналу призводить до імпіджменту трансплантата й нестабільності колінного суглоба [37].

Щодо кута нахилу тибіального каналу, оптимальний — $\geq 65^\circ$ був зафіксований лише у 61 % обстежень. S. M. Howell і співавт. та R. Simmons і співавт. рекомендують дотримуватись 65° – 70° , оскільки гострі кути асоціюються з коротшими каналами, гіршою фіксацією трансплантата та підвищеним ризиком втрати згинання [30, 31].

Е. Рена і співавт. показали, що надто гострий кут сприяє овальному виходу каналу, що знижує прилягання трансплантата до стінок [32]. У нашому дослідженні в 49 % випадків він менший за рекомендований, що узгоджується з іншими джерелами, як можлива причина порушеної інтеграції.

Таблиця 3
Дані при вимірюванні точки входу
тибіального каналу на сагітальній проєкції

Референтні значення (%)	< 28	28–63	> 63
К-сть обстежень (%)	21	38	41

Таблиця 4
Залежність діаметра точки входу каналу (мм)
від кута нахилу [29]

Кут нахилу тибіального каналу	Діаметр каналу (мм)		
	8	9	10
35°	13,9	15,7	17,4
45°	11,3	12,7	14,1
55°	9,8	10,9	12,2
65°	8,8	9,9	11,0
75°	8,3	9,3	10,3

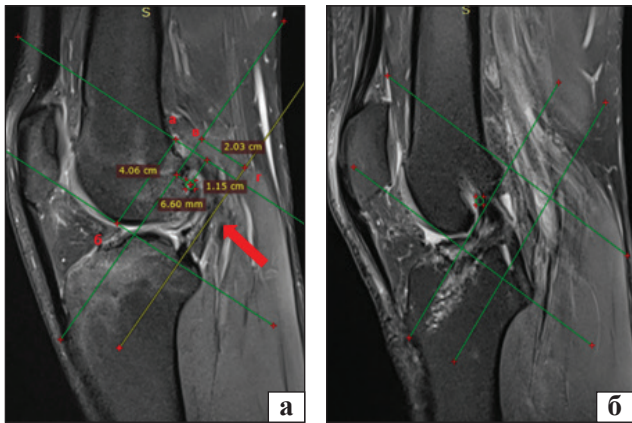


Рис. 4. МРТ, сагітальна проекція. Лінія а–б задньо-передній напрямком, лінія в–г верхньо-нижній. Стрілкою позначено коло, точка входу феморального каналу. На зображенні точка входу розташована у задньо-передньому напрямку та в 33 % у верхньо-нижньому (а); точка входу феморального каналу знаходиться поза прямокутником Bernhard and Hertel (б)

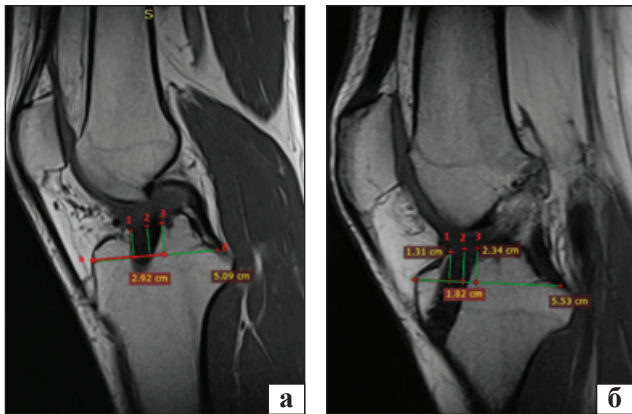


Рис. 5. Вимірювання точки входу тібіального каналу на сагітальній проекції МРТ-візуалізації. а–б лінія Amis i Jacob. 1 — точка переднього краю тібіального каналу, 2 — точка середини тібіального каналу, 3 — точка заднього краю тібіального каналу. На знімку розташування каналу в межах: 33–57 %, середина в 46 % від усієї передньо-задньої відстані плато, та знаходиться в допустимих межах (а); 24–42 %, середина в 33 % від усієї передньо-задньої відстані плато, та знаходиться занадто допереду. Трансплантат відсутній (б)

Використання МРТ для вивчення розташування каналів є ефективним. Проте, як зазначено в дослідженні А. Hart і співавт., навіть із використанням 3D-МРТ, точне відтворення їхнього анатомічного положення залишається складним завданням [38].

Наше дослідження має кілька обмежень: по-перше, ретроспективний характер може впливати на об'єктивність оцінки; по-друге, відсутність клінічної кореляції з функціональними результатами позначається на аналізі технічних помилок.

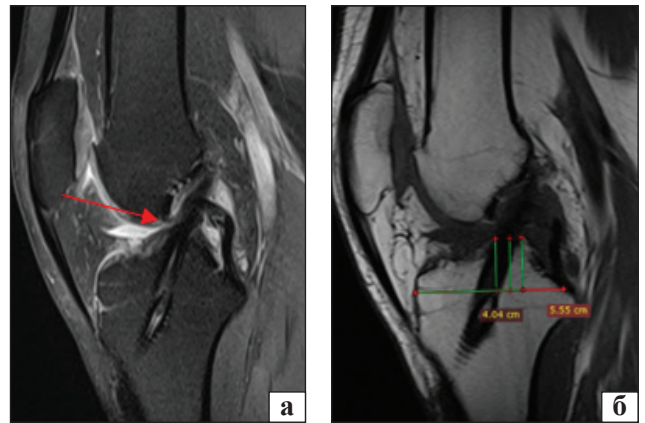


Рис. 6. Вимірювання точки входу тібіального каналу на сагітальній проекції МРТ-візуалізації (а). Сагітальна проекція в T2 режимі, стрілкою позначено інтегрований трансплантат ПСЗ (б)

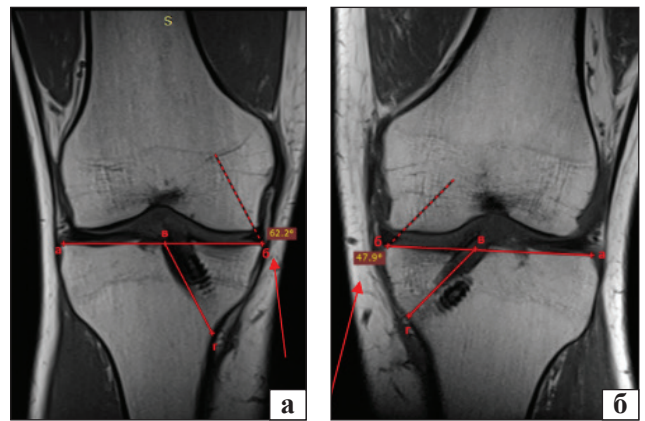


Рис. 7. Вимірювання кута нахилу великогомілкового каналу на коронарній проекції. Лінія а–б проведена паралельно до плато, лінія в–г проведена через тібіальний канал. бвг — кут нахилу каналу, стрілка вказує на градуси. Кут нахилу 62° (а). Кут нахилу каналу занадто гострий — 48° (б)

Висновки

Невірне визначення нахилу стегнового каналу виявлено у 37 % випадків. Лише в одному з 105 обстежень цей показник виходив за межі норми за умов оптимальних інших параметрів і зруйнованого трансплантата. Це не дозволяє стверджувати, що лише нахил каналу на коронарній проекції є причиною невдачі. Проте він може свідчити про загальну похибку формування каналу, зокрема щодо його довжини.

Точка входу феморального каналу є критично важливою. За адаптованим методом Bernhard and Hertel лише в 46 % випадків вона була в межах норми; у 42 — поза межами прямокутника на сагітальній проекції. Це вказує на можливу помилку під час визначення анатомічного місця кріплення ПСЗ, що може призвести до нестабільності,

імпіджменту, порушення інтеграції та втрати трансплантата. Метод потребує подальшого вдосконалення, зокрема розробки ПЗ для обробки МРТ.

Під час вимірювання кута нахилу тібіального каналу він часто виявлявся занадто гострим. Його вплив складно оцінити ізольовано через інші технічні похибки. Проте виявлено залежність кута від точки входу, що може впливати на інтеграцію трансплантата.

Здебільшого канал розміщувався більш дозadu, що ймовірно пов'язано з уникненням імпіджменту. У таких випадках трансплантат зберігався у 4 рази частіше, ніж за переднього розташування, що свідчить про небезпеку імпіджменту. Водночас занадто вертикальне розташування може не забезпечити ротаційної стабільності.

Максимально анатомічне проведення каналів є критичним для успішної реконструкції. Найважливішими технічними чинниками залишаються визначення точок входу феморального і тібіального каналів. Кут нахилу є менш принциповим, але може вказувати на технічні похибки. Тому необхідне ретельне планування, чітке визначення анатомічних орієнтирів та, за потреби, використання навігації або ЕОП.

Конфлікт інтересів. Автори декларують відсутність конфлікту інтересів.

Перспективи подальших досліджень. Незважаючи на обмеження, результати нашого дослідження підкреслюють важливість точного визначення точки входу та кута нахилу каналів під час реконструкції ПСЗ. Використання МРТ як інструмента для передопераційного планування та постопераційного аналізу може допомогти хірургам уникнути технічних помилок і покращити результати лікування.

Інформація про фінансування. Це дослідження не є комерційним і не має стороннього фінансування.

Внесок авторів. Коструб О. О. — ідея та концепція дослідження, вивчення результатів, формулювання висновків; Дідух П. В. — структура та написання роботи, формулювання методів дослідження; Нікіфорова І. М. — підготовка та добір МРТ-досліджень; Засаднюк І. А. — зведення даних результатів дослідження, статистична обробка результатів; Блонський Р. І. — оцінювання й обговорення результатів; Подік В. А. — літературний пошук, оформлення літературних джерел, зведення даних у таблиці Excel.

Список літератури

1. Kaeding, C. C., Léger-St-Jean, B., & Magnussen, R. A. (2017). Epidemiology and diagnosis of anterior cruciate ligament injuries. *Clinics in sports medicine*, 36(1), 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.csm.2016.08.001>.
2. Agel, J., Rockwood, T., & Klossner, D. (2016). Collegiate ACL injury rates across 15 sports. *Clinical journal of sport medicine*, 26(6), 518–523. <https://doi.org/10.1097/jsm.0000000000000290>.
3. Beck, N. A., Lawrence, J. T., Nordin, J. D., DeFor, T. A., & Tompkins, M. (2017). ACL tears in school-aged children and adolescents over 20 years. *Pediatrics*, 139(3). <https://doi.org/10.1542/peds.2016-1877>.
4. Kooy, C. E., Jakobsen, R. B., Fenstad, A. M., Persson, A., Visnes, H., Engebretsen, L., & Ekås, G. R. (2023). Major increase in incidence of pediatric ACL reconstructions from 2005 to 2021: A study from the Norwegian knee ligament register. *The American journal of sports medicine*, 51(11), 2891–2899. <https://doi.org/10.1177/03635465231185742>.
5. Duerr, R., Ormseth, B., Adelstein, J., Garrone, A., DiBartola, A., Kaeding, C., Flanigan, D., Siston, R., & Magnussen, R. (2023). Elevated posterior tibial slope is associated with anterior cruciate ligament reconstruction failures: A systematic review and meta-analysis. *Arthroscopy: The journal of arthroscopic & related surgery*, 39(5), 1299–1309.e6. <https://doi.org/10.1016/j.arthro.2022.12.034>.
6. Zbrojkiewicz, D., Vertullo, C., & Grayson, J. E. (2018). Increasing rates of anterior cruciate ligament reconstruction in young Australians, 2000–2015. *Medical journal of Australia*, 208(8), 354–358. <https://doi.org/10.5694/mja17.00974>.
7. Sutherland, K., Clatworthy, M., Fulcher, M., Chang, K., & Young, S. W. (2019). Marked increase in the incidence of anterior cruciate ligament reconstructions in young females in New Zealand. *ANZ Journal of surgery*, 89(9), 1151–1155. <https://doi.org/10.1111/ans.15404>.
8. Weitz, F. K., Sillanpää, P. J., & Mattila, V. M. (2019). The incidence of paediatric ACL injury is increasing in Finland. *Knee surgery, sports traumatology, arthroscopy*, 28(2), 363–368. <https://doi.org/10.1007/s00167-019-05553-9>.
9. Best, M. J., Zikria, B. A., & Wilckens, J. H. (2020). Anterior cruciate ligament injuries in the older athlete. *Sports health: a multidisciplinary approach*, 13(3), 285–289. <https://doi.org/10.1177/1941738120953426>.
10. Ireland, M. L. (2002). The female ACL: Why is it more prone to injury? *Orthopedic clinics of north America*, 33(4), 637–651. [https://doi.org/10.1016/s0030-5898\(02\)00028-7](https://doi.org/10.1016/s0030-5898(02)00028-7).
11. Zbrojkiewicz, D., Vertullo, C., & Grayson, J. E. (2018). Increasing rates of anterior cruciate ligament reconstruction in young Australians, 2000–2015. *Medical journal of Australia*, 208(8), 354–358. <https://doi.org/10.5694/mja17.00974>.
12. Papaleontiou, A., Poupard, A. M., Mahajan, U. D., & Tsantanis, P. (2024). Conservative vs surgical treatment of anterior cruciate ligament rupture: A systematic review. *Cureus*. <https://doi.org/10.7759/cureus.56532>.
13. Fabricant, P. D., Lakomkin, N., Cruz, A. I., Spitzer, E., Lawrence, J. T., & Marx, R. G. (2016). Early ACL reconstruction in children leads to less meniscal and articular cartilage damage when compared with conservative or delayed treatment. *Journal of ISAKOS*, 1(1), 10–15. <https://doi.org/10.1136/jisakos-2015-000012>.
14. Fabricant, P. D., Lakomkin, N., Cruz, A. I., Spitzer, E., & Marx, R. G. (2016). ACL reconstruction in youth athletes results in an improved rate of return to athletic activity when compared with non-operative treatment: A systematic review of the literature. *Journal of ISAKOS*, 1(2), 62–69. <https://doi.org/10.1136/jisakos-2015-000013>.
15. Crawford, S. N., Waterman, M. B., & Lubowitz, J. H. (2013). Long-term failure of anterior cruciate ligament reconstruction. *Arthroscopy: The journal of arthroscopic & related surgery*, 29(9), 1566–1571. <https://doi.org/10.1016/j.arthro.2013.04.014>.
16. Van Eck, C. F., Kropf, E. J., Romanowski, J. R., Lesniak, B. P., Tranovich, M. J., Van Dijk, C. N., & Fu, F. H. (2010). ACL Graft re-rupture after double-bundle reconstruction: Factors that influence the intra-articular pattern of injury. *Knee surgery, sports traumatology, arthroscopy*, 19(3), 340–346. <https://doi.org/10.1007/s00167-010-1297-8>.
17. Thomas, N. P., Kankate, R., Wandless, F., & Pandit, H. (2005). Revision anterior cruciate ligament reconstruction using a 2-Stage technique with bone grafting of the tibial tunnel.

- The american journal of sports medicine*, 33(11), 1701–1709. <https://doi.org/10.1177/0363546505276759>
18. Yan, X., Yang, X., Feng, J., Liu, B., & Hu, Y. (2020). Does revision anterior cruciate ligament (ACL) reconstruction provide similar clinical outcomes to primary ACL reconstruction? A systematic review and meta-analysis. *Orthopaedic surgery*, 12(6), 1534–1546. <https://doi.org/10.1111/os.12638>
 19. White, N. P., Borque, K. A., Jones, M. H., & Williams, A. (2020). Single-stage revision anterior cruciate ligament reconstruction: Experience with 91 patients (40 elite athletes) using an algorithm. *The American journal of sports medicine*, 49(2), 364–373. <https://doi.org/10.1177/0363546520976633>
 20. Matassi, F., Giabbani, N., Arnaldi, E., Tripodo, A., Bonaspetti, G., Bait, C., Ronga, M., Di Benedetto, P., Zaffagnini, S., Jannelli, E., Schiavone Panni, A., & Berruto, M. (2022). Controversies in ACL revision surgery: Italian expert group consensus and state of the art. *Journal of orthopaedics and traumatology*, 23(1). <https://doi.org/10.1186/s10195-022-00652-9>
 21. Ragab, A., Akeel, W., Ghanate, V., Elalfy, O., Guro, R., Chandratreya, A., & Chandratreya, A. (2020). Outcome of single stage revision ACL reconstruction. Retrospective study and review of literature. *Ortopedia traumatologia rehabilitacja*, 22(3), 187–194. <https://doi.org/10.5604/01.3001.0014.3235>
 22. Illingworth, K. D., Hensler, D., Working, Z. M., Macalena, J. A., Tashman, S., & Fu, F. H. (2011). A simple evaluation of anterior cruciate ligament femoral tunnel position. *The American journal of sports medicine*, 39(12), 2611–2618. <https://doi.org/10.1177/0363546511420128>
 23. Parkar, A. P., Adriaensen, M. E., Strand, T., Inderhaug, E., Harlem, T., & Solheim, E. (2013). How to read post-operative radiographs and CT scans after single-bundle anterior cruciate ligament reconstruction. *Skeletal radiology*, 42(11), 1489–1500. <https://doi.org/10.1007/s00256-013-1686-4>
 24. Amis, A. A., & Jakob, R. P. (1998). Anterior cruciate ligament Graft positioning, tensioning and twisting. *Knee surgery, sports traumatology, arthroscopy*, 6(S1). <https://doi.org/10.1007/s001670050215>
 25. Bird, J. H., Carmont, M. R., Dhillon, M., Smith, N., Brown, C., Thompson, P., & Spalding, T. (2011). Validation of a new technique to determine Midbundle femoral tunnel position in anterior cruciate ligament reconstruction using 3-Dimensional computed tomography analysis. *Arthroscopy: The journal of arthroscopic & related surgery*, 27(9), 1259–1267. <https://doi.org/10.1016/j.arthro.2011.03.077>
 26. Stäubli, H., & Rauschnig, W. (1994). Tibial attachment area of the anterior cruciate ligament in the extended knee position. *Knee surgery, sports traumatology, arthroscopy*, 2(3), 138–146. <https://doi.org/10.1007/bf01467915>
 27. Frank, R. M., Seroyer, S. T., Lewis, P. B., Bach, B. R., & Verma, N. N. (2010). MRI analysis of tibial position of the anterior cruciate ligament. *Knee surgery, sports traumatology, arthroscopy*, 18(11), 1607–1611. <https://doi.org/10.1007/s00167-010-1192-3>
 28. Howell, S., & Hull, M. (2009). Checkpoints for judging tunnel and anterior cruciate ligament Graft placement. *Journal of knee surgery*, 22(02), 161–170. <https://doi.org/10.1055/s-0030-1247744>
 29. Strobil, M. (2002). *Manual of Arthroscopic surgery*. Springer Science & Business Media
 30. Howell, S. M., Gittins, M. E., Gottlieb, J. E., Traina, S. M., & Zoellner, T. M. (2001). The relationship between the angle of the tibial tunnel in the coronal plane and loss of flexion and anterior laxity after anterior cruciate ligament reconstruction. *The American journal of sports medicine*, 29(5), 567–574. <https://doi.org/10.1177/03635465010290050801>
 31. Simmons, R., Howell, S. M., & Hull, M. L. (2003). Effect of the angle of the femoral and tibial tunnels in the coronal plane and incremental excision of the posterior cruciate ligament on tension of an anterior cruciate ligament Graft. *The Journal of bone and joint surgery-american volume*, 85(6), 1018–1029. <https://doi.org/10.2106/00004623-200306000-00006>
 32. Peña, E., Calvo, B., Martinez, M., Palanca, D., & Doblaré, M. (2006). Influence of the tunnel angle in ACL reconstructions on the biomechanics of the knee joint. *Clinical biomechanics*, 21(5), 508–516. <https://doi.org/10.1016/j.clinbiomech.2005.12.013>
 33. Rue, J. H., Ghodadra, N., & Bach, B. R. (2008). Femoral tunnel placement in single-bundle anterior cruciate ligament reconstruction. *The American journal of sports medicine*, 36(1), 73–79. <https://doi.org/10.1177/0363546507311093>
 34. Rue, J., Ghodadra, N., Lewis, P., & Bach, B. (2008). Femoral and tibial tunnel position using a Transtibial drilled anterior cruciate ligament reconstruction technique. *Journal of knee surgery*, 21(03), 246–249. <https://doi.org/10.1055/s-0030-1247826>
 35. Parkar, A. P., Adriaensen, M., Luyckx, T., Bellemans, J., & Victor, J. (2013). The femoral tunnel angle and inclination angle are reliable methods for evaluating tunnel position after ACL reconstruction. *Skeletal Radiology*, 42(3), 393–401. <https://doi.org/10.1007/s00256-012-1483-7>
 36. Nema, S. K., Balaji, G., Akkilagunta, S., Menon, J., Poduval, M., & Patro, D. (2017). Radiologic assessment of femoral and tibial tunnel placement based on anatomic landmarks in arthroscopic single bundle anterior cruciate ligament reconstruction. *Indian journal of orthopaedics*, 51(3), 286–291. https://doi.org/10.4103/ortho.ijortho_219_16
 37. Sharma, M., Jain, H., Raichandani, K., & Agarwal, S. (2021). Evaluation of location of femoral and tibial tunnels after Arthroscopic anterior cruciate ligament reconstruction: A longitudinal study. *Journal of clinical and diagnostic research*. <https://doi.org/10.7860/jcdr/2021/48824.15534>
 38. Hart, A., McCarthy, M.,, & Sheehan, J. (2020). Three-dimensional magnetic resonance imaging for guiding tibial and femoral tunnel position in anterior cruciate ligament reconstruction: a cadaveric study. *Orthopaedic journal of sports medicine*, 8(4). <https://doi.org/10.1177/2325967120915709>

Стаття надійшла до редакції 29.04.2025	Отримано після рецензування 12.05.2025	Прийнято до друку 19.05.2025
---	---	---------------------------------

CRITICAL PARAMETERS OF TUNNEL POSITIONING IN ACL RECONSTRUCTION: A RETROSPECTIVE MRI ANALYSIS

O. O. Kostrub ¹, P. V. Didukh ¹, I. M. Nikiforova ², I. A. Zasadnyuk ¹, R. I. Blonskyi ¹, V. A. Podik ¹

¹ SI «National Institute of Traumatology and Orthopedics of the NAMS of Ukraine», Kyiv

² Diagnostic center M24, Kyiv. Ukraine

✉ Oleksandr Kostrub, MD, DMSci, Prof.: akostrub@ukr.net; <https://orcid.org/0000-0001-7925-9362>

✉ Petro Didukh, MD: didukhtravm@gmail.com ; <https://orcid.org/0000-0002-7848-7061>

✉ Iryna Nikiforova, MD: iryna.nikiforova.m24@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0006-8933-6759>

✉ Ivan Zasadnyuk, MD, PhD: zasadnyuk@ukr.net; <https://orcid.org/0000-0002-1099-4454>

✉ Roman Blonskyi, MD, DMSci: drblonskiy@ukr.net; <https://orcid.org/0000-0003-2310-6345>

✉ Volodymyr Podik, MD: podikvolodymyr@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-4644-9159>