

УДК 616.728.3-089.15-16
EDN: IETIKR
<https://doi.org/10.15275/ssmj2201024>

Оригинальная статья

ПЕРСОНАЛИЗИРОВАННАЯ ТЕХНИКА РОТАЦИОННОГО ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ БЕДРЕННОГО КОМПОНЕНТА ЭНДОПРОТЕЗА КОЛЕННОГО СУСТАВА

Р.А. Зубавленко, В.В. Островский, О.Ю. Воскресенский

ФГБОУ ВО «Саратовский государственный медицинский университет им. В.И. Разумовского» Минздрава России,
Саратов, Россия

PERSONALIZED TECHNIQUE FOR THE ROTATION ALIGNMENT OF THE KNEE IMPLANT FEMORAL COMPONENT

R.A. Zubavlenko, V.V. Ostrovskij, O.Yu. Voskresenskij

V.I. Razumovsky Saratov State Medical University, Saratov, Russia

Для цитирования: Зубавленко Р.А., Островский В.В., Воскресенский О.Ю. Персонализированная техника ротационного позиционирования бедренного компонента эндопротеза коленного сустава. Саратовский научно-медицинский журнал. 2026; 22 (1): 24-31. EDN: IETIKR. <https://doi.org/10.15275/ssmj2201024>

Аннотация. *Цель:* разработать персонализированную технику ротационного позиционирования бедренного компонента эндопротеза коленного сустава. *Материал и методы.* Исследование базируется на результатах ретроспективного анализа компьютерных томограмм 127 пациентов, страдающих остеоартрозом коленного сустава I–III стадии по классификации Н.С. Косинской. Определены анатомическая, хирургическая надмыщелковые и задняя мыщелковая линии, которые обычно используются в предоперационном планировании для позиционирования бедренного компонента эндопротеза коленного сустава. Описана более точная новая линия, обозначенная как передняя касательная, которая в настоящее время не применяется в отечественной практике (RU 2819654 C1, 2024). *Результаты.* Стандартная инклинация наружной ротации (3°) не является универсальной для всех пациентов, поскольку угол между хирургической и задней мыщелковыми линиями варьирует в диапазоне $1,5^\circ$ ($0,6\text{--}4,3^\circ$) на III стадии остеоартрита. В процессе анализа выявлены статистически значимые сильные корреляции между углами, образованными передней касательной и хирургической, а также анатомической надмыщелковой линиями ($R=0,9724$). Это послужило основой для разработки методики предоперационного планирования, базирующейся на использовании передней касательной линии. *Заключение.* Разработанная персонализированная техника ротационного позиционирования бедренного компонента эндопротеза коленного сустава обладает значительным практическим потенциалом благодаря тесной связи передней касательной линии с анатомической и хирургической надмыщелковыми линиями, определяемыми посредством стандартных угловых измерений.

Ключевые слова: тотальное эндопротезирование коленного сустава, ротация бедренного компонента, пателлофemorальная боль, ротация эндопротеза коленного сустава, предоперационное планирование

For citation: Zubavlenko RA, Ostrovskij VV, Voskresenskij OYu. Personalized technique for the rotation alignment of the knee implant femoral component. Saratov Journal of Medical Scientific Research. 2026; 22 (1): 24-31. (In Russ.) EDN: IETIKR. <https://doi.org/10.15275/ssmj2201024>

Abstract. *Objective:* the designing of the personalized technique for rotational alignment of the knee implant femoral component. *Material and methods.* This study is based on the findings of the retrospective analysis of 127 CT knee scans from patients who suffered I–III stages of knee osteoarthritis by N.S. Kosinskaya classification. The anatomical and surgical supracondylar and posterior condylar lines commonly used in preoperative planning for the alignment of knee implant femoral component were defined. A new more precise line designated as the front tangent was also described; this is not yet used in the national practice (patent for invention RU 2819654 C1, 2024). *Results.* The standard external rotation inclination (3°) is not universal for all patients because the angle between the surgical and posterior condylar lines varies in the range of 1.5° ($0.6\text{--}4.3^\circ$) in stage III osteoarthritis. The analysis revealed statistically significant strong correlations between the angles formed by the anterior tangent and the surgical lines, as well as the anatomical supracondylar line ($R=0.9724$). These served as the basis for the designing of a preoperative planning technique that rests on the anterior tangent line. *Conclusion.* The designed personalized technique for rotational alignment of the knee implant femoral component features significant practical potential due to the close relationship of the anterior tangent line with the anatomical and surgical supracondylar lines determined by standard angular measurements.

Keywords: total knee arthroplasty, femoral component rotation, patellofemoral pain, knee implant rotation, preoperative planning

Введение. В последние десятилетия наблюдается значимый рост числа пациентов, страдающих остеоартритом (ОА) крупных суставов и нуждающихся в тотальном эндопротезировании (ТЭП) коленного сустава [1].

Выявлено, что корректная ротация бедренного компонента коленного эндопротеза играет ведущую роль в достижении благоприятных долгосрочных клинико-функциональных исходов после ТЭП коленного сустава [2]. Ротационное положение бедренного компонента существенно влияет на стабильность сгибательных движений и кинематические характеристики тибioфemorального и пателлофemorального суставов. Этот аспект играет важную роль в биомеханике нижних конечностей и ортопедической практике, так как правильное выравнивание компонентов эндопротеза улучшает функциональные возможности пациента и снижает риск осложнений [3]. Неправильное позиционирование бедренного компонента может привести к асимметрии амплитуды сгибания, формированию контрактур, хронической нестабильности, особенно при ходьбе по ступенькам. Кроме того, наблюдается односторонний износ полиэтиленового вкладыша, послеоперационная боль в переднем отделе коленного сустава и раннее развитие асептической нестабильности компонентов эндопротеза [4].

Задняя мыщелковая линия (PCL) является стандартным интраоперационным маркером определения ротации бедренного компонента эндопротеза коленного сустава. Однако, согласно некоторым исследованиям, хирургическая (S-TEA) и анатомическая (A-TEA) надмыщелковые линии лучше коррелируют с кинематической осью вращения коленного сустава при сгибании и разгибании. Эти линии считаются предпочтительными для установки бедренного компонента, но определить их визуально интраоперационно затруднительно [5, 6].

При ТЭП коленного сустава обычно требуется 3° внешней ротации бедренного компонента относительно PCL, по данным литературы [7, 8]. Основным критерием считается задний мыщелковый угол (PCA), который находится между PCL и S-TEA. Недавнее исследование на основе данных компьютерных томограмм (КТ) пациентов с ТЭП показало значительные различия в значениях PCA. Это подчеркивает важность изучения индивидуальных анатомических особенностей для улучшения хирургических методов и повышения эффективности протезирования [9].

В дополнение к этому проведенный анализ показал, что фиксированный угол PCA соответствует анатомическим требованиям осевой ротации только у 59% пациентов. В 32% случаев наблюдалось превышение данного угла в пределах от 1° до 5° , тогда как в 9% случаев угол PCA оказался ниже требуемых значений, демонстрируя внутреннюю ротацию в диапазоне от 2° до 5° [9].

Вопрос о детерминантах ротации бедренной кости остается дискуссионным в профессиональной среде. Тем не менее результаты исследования P. Aglietti и соавт. [10] продемонстрировали наличие линейной корреляции между PCL и углом вальгусного отклонения бедренной кости. Данные исследования свидетельствуют о том, что при увеличении деформации с варусной до вальгусной наблюдается увеличение PCA. Однако T. Luuskс и соавт. выявили относительно слабую корреляцию ($R=-0,37$) [11], что подчеркивает сложность взаимосвязей между

анатомическими структурами и функциональными параметрами коленного сустава.

В рамках комплексного исследования выявлена тенденция к незначительному увеличению средних показателей внутренней ротации у пациентов с вальгусной деформацией коленных суставов. В то же время у пациентов с варусной деформацией коленных суставов зафиксировано значительное превышение нормы внешней ротации – более 6° , что указывает на выраженные патологические изменения в структуре и функции нижних конечностей [9].

Цель – разработать персонализированную технику ротационного позиционирования бедренного компонента эндопротеза коленного сустава.

Материал и методы. В рамках настоящего исследования проведена детальная и всесторонняя оценка состояния коленного сустава у 127 пациентов, страдающих ОА коленного сустава I–III стадии по классификации, предложенной Н.С. Косинской. Данная когорта пациентов включала индивидов в возрасте от 30 до 70 лет, при этом гендерное распределение было строго сбалансировано. Исследование проводили на базе Научно-исследовательского института травматологии, ортопедии и нейрохирургии ФГБОУ ВО «Саратовский государственный медицинский университет им. В.И. Разумовского» Минздрава России (НИИТОН «Саратовский ГМУ им. В.И. Разумовского» Минздрава России).

В рамках данного исследования проанализированы результаты КТ и выявлено, что 50 пациентов имели ОА коленного сустава I стадии, 47 – II стадии, а 30 пациентов – III стадии.

Нами инициирован комплексный анализ причин и структуры погрешностей, возникающих при сопоставительном анализе стандартных фиксированных анатомических ориентиров в предоперационном КТ-анализе в аксиальной проекции. Данная исследовательская инициатива направлена на выявление ранее не задействованной анатомической зоны, что предоставит уникальную возможность для разработки персонализированного метода, оптимизирующего планирование ротации бедренного компонента при ТЭП коленного сустава.

Исследование проводили в период с января 2024 г. по сентябрь 2025 г., в ходе которого выполнялось измерение и определение взаимосвязи между углами, образованными линиями, проходящими через определенные анатомические точки бедренной кости.

Определены следующие линии и углы между ними: A TEA, S TEA и PCL, которые обычно используются в стандартных процедурах предоперационного планирования для ротационного позиционирования бедренного компонента эндопротеза коленного сустава (рис. 1).

Новая линия, проходящая через выступающие элементы компактного костного вещества дистального метафиза бедренной кости в области верхнего полюса надколенника (передняя касательная линия), обозначена как FAT (см. рис. 1).

Статистический анализ данных. Статистический анализ данных проводили с использованием программного обеспечения IBM SPSS Statistics v. 20 (IBM, США), программы Statistica 13.3 (StatSoft, США). Для проверки гипотез о нормальности распределения применялись критерии Шапиро – Уилка (W) и Колмогорова – Смирнова (K–S). Если распределение соответствовало нормальному закону, то дополнительно оценивали однородность дисперсий с помощью теста Левене.

При выявлении статистически значимых различий между группами использовался следующий алгоритм выбора методов: для нормально распределенных

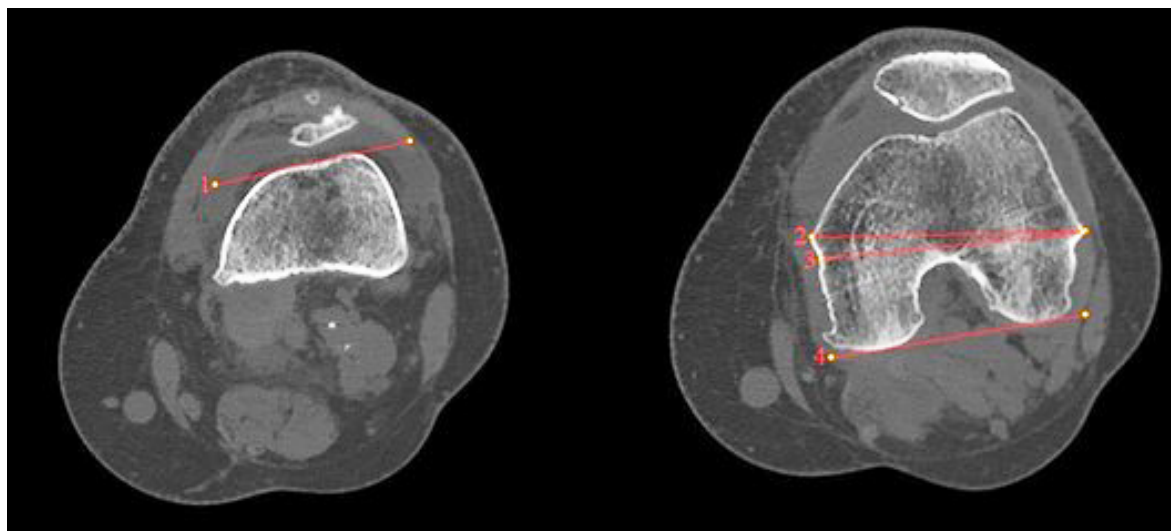


Рис. 1. Линии, проведенные через анатомические фиксированные ориентиры бедренной кости на компьютерных томограммах : 1 – FAT; 2 – A TEA; 3 – S TEA; 4 – PCL

данных применяли однофакторный дисперсионный анализ ANOVA. В случае отклонения от нормального распределения использовали ранговый метод Краскала – Уоллиса. Если обнаруживалось нарушение условия гомоскедастичности (равенство дисперсий), то применяли модификацию критерия Стьюдента с поправкой Уэлча для учета различия дисперсий. Когда дисперсии были равны, проводили классический двухвыборочный *t*-критерий Стьюдента для независимых групп. При отклонениях от нормальности применялся непараметрический *U*-тест Манна – Уитни для оценки разницы медиан.

Коррекцию уровня значимости при проведении множества сравнительных тестов осуществляли методами множественного тестирования, такими как коррекция Бонферрони или метод ложного открытия (false discovery rate, Benjamini-Hochberg procedure).

Для анализа нормально распределенных данных применяли традиционные статистические параметры: среднее арифметическое значение (*M*) и 95% доверительный интервал (ДИ), обеспечивающие исчерпывающее описание центральной тенденции и вариабельности, что соответствует современным стандартам представления количественных данных в научной литературе. В случае переменных с ненормальным распределением использовали медиану (*Me*), межквартильный размах (Q_1-Q_3), что позволило более точно охарактеризовать центральные и крайние значения.

Оценку силы связи между изучаемыми показателями осуществляли путем расчета коэффициента линейной корреляции Пирсона (RR). Значения $R < 0,3$ свидетельствовали о слабой взаимосвязи признаков, $R = 0,3-0,7$ интерпретировали как умеренную связь, а $R \geq 0,7$ говорили о сильной зависимости.

Для показателей, подчиняющихся нормальному распределению, выполнен регрессионный анализ, включающий построение регрессионных уравнений с ДИ 95% надежности для каждого предиктора. Коэффициент детерминации варьируется в пределах от 0 до 1, и чем ближе его значение к 1, тем выше качество модели. При формировании статистической модели учтена проблема мультиколлинеарности между независимыми переменными. Для этого проведен анализ корреляционной матрицы и использованы методы устранения мультиколлинеарности, применение процедур регрессионного анализа с пошаговым

включением/исключением переменных. Критерий Фишера применялся для оценки статистической значимости модели. Результаты признаны статистически значимыми при $p < 0,05$.

Результаты. В рамках первичного анализа проведена комплексная процедура вычисления дескриптивных статистик, а также осуществлена проверка нормальности распределения данных. Анализ показателей FAT/A TEA, FAT/S TEA, FAT/PCL, S TEA/A TEA и A TEA/PCL продемонстрировал их соответствие нормальному распределению. Это позволяет утверждать, что наиболее репрезентативными характеристиками данных показателей являются *M* и 95% ДИ. В то же время показатель S TEA/PCL не подчиняется нормальному распределению, и для характеристики центральной тенденции данных будет использована *Me* и 25 и 75% квартили – Q_1-Q_3 (табл. 1).

У пациентов с гонартрозом на стадиях I–III наблюдались характерные изменения углов между фиксированными анатомическими ориентирами бедренной кости, что отражено в табл. 1.

Анализ описательной статистики показал следующее: угол FAT/A TEA монотонно увеличивался на каждой последующей стадии заболевания, достигнув максимального значения на III стадии (+12,9% по сравнению с I стадией, средний угол составил 12,59° против 14,12° на I стадии).

Углы FAT/S TEA и FAT/PCL показали схожую положительную динамику: рост составил +17,7% и +18,6% соответственно, относительно начальной стадии (8,23° → 9,69°, 6,76° → 8,03°).

Изменения угла S TEA/A TEA происходили умеренно, демонстрируя общий прирост около 4% (от 4,49° на I стадии до 4,66° на III стадии).

Наиболее нестабильный и существенно отличающийся от остальных параметров, не подчиняющийся нормальному закону распределения, оказался угол S TEA/PCL. Этот угол оставался практически постоянным на всех трех стадиях заболевания, варьируя в узких пределах: 1,6 (0,9–2,6)° на I стадии, 1,3 (0,7–2,1)° на II и 1,5 (0,6–4,3)° на III стадии.

Напротив, угол A TEA/PCL оставался также практически неизменным на всех трех стадиях заболевания, колеблясь незначительно (6,08° на I стадии и 6,03° на III стадии).

Для подтверждения возможности проведения однофакторного дисперсионного анализа (ANOVA) с применением шести показателей, связанных с углами между фиксированными ориентирами бедренной кости у пациентов с гонартрозом на стадиях I–III, проведен анализ однородности дисперсий с использованием теста Левена (Levene's Test).

Результаты данного анализа свидетельствуют о том, что для всех исследуемых параметров получены низкие значения статистики теста (Statistic) и высокие значения p , которые превышали критический уровень значимости ($\alpha=0,05$). Это позволило принять нулевую гипотезу о равенстве дисперсий в сравниваемых группах при $p>0,05$. Конкретные результаты представлены в табл. 2.

Поскольку дисперсии оказались гомогенными, выполнен полный анализ результатов дисперсионного анализа (ANOVA), проведенного между 3 группами пациентов с различными стадиями гонартроза (I, II, III) по 5 ключевым показателям, характеризующим углы

между фиксированными анатомическими ориентирами бедренной кости.

Проведенный анализ выявил статистически значимое влияние показателя FAT/A TEA на стадии остеоартрита (F-статистика = 4,25; $p=0,016$). Это свидетельствует о наличии значимой разницы в параметрах группы FAT/A TEA между различными стадиями остеоартрита, что подтверждает наличие потенциального влияния данного фактора в рамках данного исследования. Однако, учитывая эффект стадирования, практическое применение данного анатомического показателя представляется затруднительным.

Остальные исследуемые параметры (FAT/S TEA, FAT/PCL, S TEA/A TEA, A TEA/PCL) не продемонстрировали статистически значимых различий. Это указывает на то, что вариации данных параметров не оказывают существенного влияния на стадии остеоартрита. Следовательно, эти показатели могут быть эффективно использованы при планировании и интраоперационном определении ротации бедренного компонента эндопротеза коленного сустава.

Таблица 1

Основные данные и выявленные параметры в исследованной когорте КТ-исследований коленных суставов

Показатель	Оценочный метод	Стадия ОА	Количество	$M \pm SD$ (95% ДИ)/ $Me [Q_1-Q_3]^a$	K-S	W
FAT/A TEA	Параметрический	I	50	12,59 $\pm$ 3,03 (11,73–13,45)	0,118	0,125
FAT/S TEA	Параметрический	I	50	8,23 $\pm$ 3,17 (7,33–9,14)	0,240	0,398
FAT/PCL	Параметрический	I	50	6,76 $\pm$ 3,51 (5,76–7,76)	0,124	0,201
S TEA/A TEA	Параметрический	I	50	4,49 $\pm$ 0,69 (4,29–4,68)	0,210	0,287
S TEA/PCL	Непараметрический	I	50	1,6 [0,9–2,6]	0,014	0,037
A TEA/PCL	Параметрический	I	50	6,08 $\pm$ 1,42 (5,67–6,47)	0,177	0,320
FAT/A TEA	Параметрический	II	47	14,36 $\pm$ 2,88 (13,52–15,21)	0,242	0,463
FAT/S TEA	Параметрический	II	47	10,26 $\pm$ 2,87 (9,42–11,11)	0,488	0,240
FAT/PCL	Параметрический	II	47	8,91 $\pm$ 3,15 (7,99–9,84)	0,442	0,430
S TEA/A TEA	Параметрический	II	47	4,27 $\pm$ 0,63 (4,09–4,46)	0,318	0,239
S TEA/PCL	Непараметрический	II	47	1,3 [0,7–2,1]	0,074	0,010
A TEA/PCL	Параметрический	II	47	5,61 $\pm$ 1,6 (5,13–6,08)	0,218	0,429
FAT/A TEA	Параметрический	III	30	14,12 $\pm$ 3,61 (12,77–15,46)	0,210	0,111
FAT/S TEA	Параметрический	III	30	9,69 $\pm$ 3,65 (8,32–11,05)	0,396	0,252
FAT/PCL	Параметрический	III	30	8,03 $\pm$ 3,71 (6,64–9,41)	0,115	0,291
S TEA/A TEA	Параметрический	III	30	4,66 $\pm$ 0,69 (4,40–4,92)	0,410	0,465
S TEA/PCL	Непараметрический	III	30	1,5 [0,6–4,3]	0,015	0,003
A TEA/PCL	Параметрический	III	30	6,03 $\pm$ 2,4 (5,13–6,93)	0,292	0,219

Таблица 2

Результаты теста Левене для проверки однородности дисперсий углов в исследованной когорте КТ-исследований коленных суставов

Показатель	Statistic	p	Заключение
FAT/A TEA	0,23	0,79	Гомогенны
FAT/S TEA	0,18	0,84	
FAT/PCL	0,21	0,81	
S TEA/A TEA	0,15	0,86	
S TEA/PCL	0,18	0,84	
A TEA/PCL	0,25	0,78	

Таблица 3

Регрессионный анализ углов, сформированных между фиксированными анатомическими ориентирами бедренной кости на всех стадиях развития остеоартрита коленного сустава

Уравнение	R^2 ; p
FAT/S TEA=3,38+0,61×FAT/A TEA	$R^2=0,85$; $p<0,001$
FAT/S TEA=2,86+0,82×FAT/PCL	$R^2=0,78$; $p<0,001$

Примечание. Данная таблица иллюстрирует результаты регрессионного анализа, демонстрируя взаимосвязь между углом FAT/STEAFAT/STEА и двумя другими угловыми характеристиками бедренной кости: FAT/ATEAFAT/ATEА и FAT/PCLFAT/PCL; R^2 – коэффициент детерминации.

Таким образом, анатомические сочетания S TEA/PCL и FAT/A TEA не могут считаться «золотым стандартом» для определения ротации бедренного компонента эндопротеза коленного сустава, несмотря на их потенциальную клиническую значимость. Важно акцентировать внимание на упомянутых анатомических зонах, учитывая их роль в биомеханике коленного сустава и возможные вариации в зависимости от индивидуальных анатомических особенностей пациентов.

С помощью корреляционного анализа определена зависимость углов, сформированных между фиксированными анатомическими ориентирами бедренной кости на всех стадиях развития ОА коленного сустава.

На основании результатов корреляционного анализа угловых параметров, сформированных между фиксированными анатомическими маркерами бедренной кости, на всех стадиях развития ОА коленного сустава выявлены значимые положительные корреляции высокой степени силы. В частности, обнаружена сильная положительная связь между углами FAT/S TEA и FAT/A TEA с коэффициентом корреляции $R=0,9724$, что свидетельствует о высокой степени согласованности этих параметров. Выявлены также значимые положительные корреляции сильной степени между углами FAT/PCL и FAT/A TEA ($R=0,8729$) и между углами FAT/PCL и FAT/S TEA ($R=0,8723$), что подтверждает их взаимосвязь.

Однако корреляция слабой интенсивности между углами FAT/PCL и A TEA/PCL ($R=-0,3522$) претерпела изменение направления с положительного на отрицательное, что может указывать на неоднозначность фиксированного анатомического ориентира PCL. Это изменение направления корреляции может свидетельствовать о сложности и многогранности взаимосвязей между различными анатомическими параметрами при развитии ОА коленного сустава.

Следует подчеркнуть, что углы, образованные стандартными анатомическими ориентирами и не включающие в себя параметры FAT, в значительной степени не обнаруживали существенной взаимосвязи. Результаты данного исследования свидетельствуют о том, что система функционального анализа траектории FAT может играть ключевую роль в предоперационной оценке и интраоперационном позиционировании бедренного компонента эндопротеза коленного сустава.

В ходе комплексного анализа выявлены сильные корреляции между углами FAT/A TEA, FAT/S TEA и FAT/PCL. Это позволяет сделать вывод о том, что для практических и клинических задач достаточно использовать только один из этих параметров. Все три угла тесно связаны и могут быть легко вычислены друг из друга.

Далее получены регрессионные уравнения (табл. 3), моделирующие взаимосвязь между исследуемыми показателями. Данный подход позволил не только выявить значимые корреляции, но и установить причинно-следственные связи, что существенно повысило прогностическую ценность полученных результатов.

Из анализа данных, представленных в табл. 3, следует, что изменение параметра FAT/S TEA может быть с высокой степенью предсказано на основе показателей FAT/A TEA и FAT/PCL. В частности, прогностическая модель на основе FAT/A TEA демонстрирует точность предсказания более 85%, что указывает на значительную объяснительную способность данного индикатора. Аналогично FAT/PCL демонстрирует высокую прогностическую ценность для параметра FAT/S TEA, обеспечивая точность предсказания более 78%.

Таким образом, средний R^2 превышает 0,78 для обеих моделей, а низкие стандартные отклонения указывают на низкую чувствительность к изменениям выборки. Оба уравнения регрессии можно считать надежным инструментом для оценки параметра FAT/S TEA на основе переменных FAT/A TEA и FAT/PCL.

Алгоритм предоперационного планирования ротации бедренного компонента эндопротеза коленного сустава. Линия S TEA является высокоточным анатомическим ориентиром, используемым при установке бедренного компонента эндопротеза коленного сустава. Она строго соответствует ротации коленного сустава, вокруг которой осуществляются физиологические движения сгибания и разгибания голени, а также оси торсии шейки бедренной кости. Более того, эта линия совпадает с местами прикрепления коллатеральных связок коленного сустава, что обеспечивает анатомически правильное и функционально оптимальное положение эндопротеза. Определение расположения S TEA может быть затруднительным из-за ряда факторов. В частности, надмышелки и борозда, находящиеся под слоем мягких тканей и иногда отсутствующие вовсе, усложняют их пальпацию.

На основании комплексного анализа релевантной литературы и систематизации собственных экспериментальных данных разработан высокоточный алгоритм, базирующийся на персонализированной методике планирования ротации бедренного компонента при ТЭП коленного сустава. В основе предложенного подхода лежит использование ранее не задействованного анатомического ориентира FAT (рис. 2).

Данный метод значительно повышает точность и эффективность операций. Его уже успешно применяют в хирургической практике. Это доказывает его научную ценность и практическую пользу, в итоге открываются новые возможности в медицине и хирургии.

Обсуждение. Ключевой причиной неудовлетворительных биомеханических результатов после имплантации эндопротезов коленных суставов является недостаточная информативность традиционных методик предоперационного планирования. В частности, рентгенография, выполняемая в прямой проекции с захватом тазобедренного и голеностопного суставов, а также в боковой и аксиальной проекциях, только позволяет определить анатомическую и механическую оси нижней конечности и естественный задний наклон тибияльного плато, не учитывая при

этом ротационные характеристики бедренного компонента [12].

Значимость точного ротационного позиционирования бедренного компонента при ТЭП коленного сустава общепризнана, однако методы его определения остаются предметом дискуссий, особенно по сравнению с аксиальным выравниванием. Методы интраоперационного определения ротационного позиционирования бедренного компонента демонстрируют значительную вариабельность в различных исследованиях. При этом метод измеряемой резекции упоминается гораздо чаще, чем техника балансировки связок. Линия S TEA наиболее часто используется для ротационного позиционирования бедренного компонента в традиционном механическом выравнивании, когда видны медиальный и латеральный надмыщелки. Однако визуальная и мануальная идентификация бороздки медиального надмыщелка и пиковой точки латерального надмыщелка затруднена из-за их покрытия мягкими тканями [13, 14], что ограничивает применимость этого ориентира. Наше исследование также выявляет неоднозначность в стандартных протоколах S TEA, что подчеркивает необходимость дальнейшего изучения и совершенствования методик коррекции ротационных деформаций нижней конечности [15].

Параметр PCL, напротив, оказался более доступным для оценки в ходе исследования. Тем не менее выявлены значительные отклонения от предварительно заданных хирургом 3° наружной ротации. Эти результаты согласуются с данными, представленными в научной работе, где при ТЭП коленного сустава у 45% пациентов наблюдались ошибки в ротации средней степени и более при использовании 3° наружной ротации относительно задней мыщелковой линии в качестве ориентира. J. Agita и соавт. [14] утверждают, что PCL может служить надежным ориентиром

при исправлении вальгусной деформации коленного сустава. Однако при ОА коленного сустава определение PCL становится затруднительным из-за износа мыщелков и/или межмыщелковых остеофитов.

В процессе балансировки зазоров, по данным В.В. Хоминца и соавт., бедренный компонент устанавливается параллельно проксимально резецированной большеберцовой кости, обеспечивая равномерное натяжение коллатеральных связок. Вместе с тем при наличии выраженных остеофитов или повреждении связочного аппарата данная техника может быть выполнена некорректно [16]. Кроме того, неточно выполненный опил большеберцовой кости может заведомо привести к возникновению наружной или внутренней ротаций, что требует особого внимания при планировании и выполнении операции, что согласуется с данными литературы и заключениями, полученными в ходе исследования на анатомических препаратах.

В роботизированных навигационных системах, используемых в ортопедии, вопрос ротационного позиционирования бедренного компонента эндопротеза дооперационно, как правило, не рассматривается и определяется визуально-мануально хирургом в процессе оперативного вмешательства. В ретроспективном исследовании, проведенном В. Ollivier и соавт., проанализированы данные 200 пациентов, разделенных на три группы в зависимости от исходного состояния оси коленного сустава: с варусной, нейтральной и вальгусной деформацией. В рамках исследования применялась методика ротационного смещения оси коленного сустава с использованием полуактивной роботизированной системы MAKO® (Stryker), базирующейся на принципах кинематического выравнивания. Результаты исследования продемонстрировали, что при использовании кинематического выравнивания бедренный компонент демонстрировал избыточное

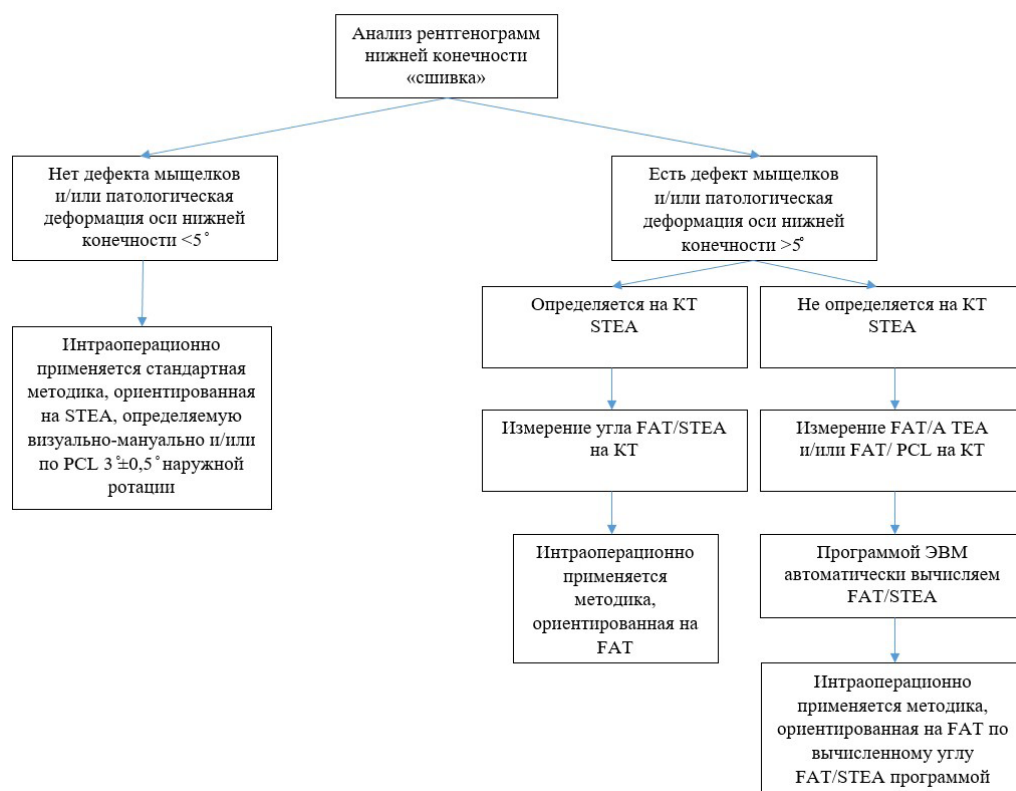


Рис. 2. Алгоритм предоперационного планирования ротации бедренного компонента эндопротеза коленного сустава

вальгусное положение и внутреннюю ротацию в группе пациентов с вальгусной деформацией, а также в меньшей степени в группе с нейтральной осью коленного сустава по сравнению с методикой функционального выравнивания [17, 18]. Таким образом, внедрение навигационных технологий в медицинские процедуры может сопровождаться некоторыми потенциальными недостатками. Позиционирование компонентов в ротационном режиме осуществлялось с использованием стандартных блоков от конкретного производителя. На эти блоки устанавливаются трекеры на прямоугольных площадках для определения фиксированных анатомических ориентиров, которые выявлялись посредством визуально-мануальной методики.

В рамках нашего исследования предложена новая система координат в переднем отделе бедренной кости, основанная на линии FAT. Данная система представляет собой альтернативный подход, который может быть применен в ситуациях, когда стандартные анатомические ориентиры не могут быть с достаточной точностью определены в ходе хирургического вмешательства. В исследовании J.H. Nam и соавт. в 2020 г. установлено, что угол между линиями FAT и S TEA составляет $6,8 \pm 6,1^\circ$ у пациентов с III и IV стадиями ОА коленного сустава по классификации Kellgren и Lawrence (1957) [19]. В нашем же исследовании данный угол составил $9,69 [8,32-11,05]^\circ$ у пациентов с III стадией по классификации H.C. Косинской (1961), что сопоставимо с данными литературы.

В работе Н.М. Ji и соавт. проведена оценка надежности указанных ориентиров для анализа ротации бедренного компонента эндопротеза [20]. В ходе исследования сравнивались линии TEA и FAT бедренной кости, что позволило выявить их сопоставимую точность и применимость. Полученные данные согласуются с результатами нашего исследования, что подтверждает их научную значимость и практическую ценность в контексте хирургической ортопедии.

Таким образом, полученные результаты обладают значительной ценностью для хирургов, специализирующихся на ТЭП коленного сустава. Они представляют важные данные о структурных особенностях коленного сустава, которые могут быть использованы для оптимизации планирования и выполнения хирургических вмешательств, что в итоге может способствовать улучшению исходов операций.

Заключение. Разработанная персонализированная техника планирования, которая опирается на измерение углов между фиксированными анатомическими ориентирами бедренной кости, показывает значительный потенциал для улучшения точности хирургических процедур. Этот алгоритм, определяющий линию FAT, представляет собой новаторское решение и может вносить существенный вклад в развитие современных отечественных технологий при ТЭП коленного сустава.

Конфликт интересов. Исследование выполнено в рамках государственного задания «Разработка хирургического навигационного инструментария для ротационного позиционирования бедренного компонента эндопротеза коленного сустава» ФГБОУ ВО «Саратовский ГМУ им. В.И. Разумовского» Минздрава России, №125030703257-1.

Вклад авторов. Все авторы внесли эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Информированное согласие на публикацию. Пациенты подписали форму добровольного информированного согласия на публикацию медицинской информации.

Соответствие принципам этики. Протокол исследования одобрен локальным этическим комитетом. Одобрение и процедуру проведения протокола получали по принципам Хельсинкской декларации.

References (Список источников)

1. Kuzin VV, Kuzin AV, Germanov AV, Shpak MA. Impact of personalized alignment technique on implant components position in total knee arthroplasty. *Genij Ortopedii* = *Genius of Orthopedics*. 2025;31(1):12-8. (In Russ.). Кузин В.В., Кузин А.В., Германов А.В., Шпак М.А. Влияние принципа персонализированного выравнивания на положение компонентов эндопротеза при тотальном эндопротезировании коленного сустава. *Гений ортопедии*. 2025;31(1):12-8. DOI:10.18019/1028-4427-2025-31-1-12-18
2. Kulyaba TA, Kornilov NN, Tekhilov RM. Guidelines for Primary Knee Arthroplasty. Saint Petersburg: R.R. Vreden National Medical Research Center of Traumatology and Orthopedics, 2022; 636 p. (In Russ.). Куляба Т.А., Корнилов Н.Н., Техилов Р.М. Руководство по первичному эндопротезированию коленного сустава. Санкт-Петербург: НМИЦ ТО им. Р.Р. Вредена, 2022; 636 с.
3. Becker R, Bäker K, Hommel H, et al. No correlation between rotation of femoral components in the transverse plane and clinical outcome after total knee arthroplasty. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*. 2019;27(5):1456-62. DOI:10.1007/s00167-018-4981-8
4. Hoffart HE, Langenstein E, Vasak N. A prospective study comparing the functional outcome of computer-assisted and conventional total knee replacement. *J Bone Joint Surg Br*. 2012;94(2):194-9. DOI:10.1302/0301-620X.94B2.27454
5. Thienpont E, Schwab PE, Paternostre F, Koch P. Rotational alignment of the distal femur: Anthropometric measurements with CT-based patient-specific instruments planning show high variability of the posterior condylar angle. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*. 2014;22(12):2995-3002. DOI:10.1007/s00167-014-3086-2
6. Asano T, Akagi M, Nakamura T. The functional flexion-extension axis of the knee corresponds to the surgical epicondylar axis: In vivo analysis using a biplanar image-matching technique. *J Arthroplasty*. 2005;20(8):1060-7. DOI:10.1016/j.arth.2004.08.005
7. Akagi M, Matsusue Y, Mata T, et al. Effect of rotational alignment on patellar tracking in total knee arthroplasty. *Clin Orthop Relat Res*. 1999;(366):155-63. DOI:10.1097/00003086-199909000-00019
8. Anouchi YS, Whiteside LA, Kaiser AD, Milliano MT. The effects of axial rotational alignment of the femoral component on knee stability and patellar tracking in total knee arthroplasty demonstrated on autopsy specimens. *Clin Orthop Relat Res*. 1993;(287):170-7. PMID: 8448937
9. Michaut M, Beaufils P, Galaud B, et al. Rotation fémorale par navigation sur la base d'un scanner préopératoire dans l'arthroplastie totale de genou: À propos de 70 cas. *Revue de Chirurgie Orthopédique et Réparatrice de l'Appareil Moteur*. 2008;(94):580-4. DOI:10.1016/j.rco.2008.03.038. (In French).
10. Aglietti P, Sensi L, Cuomo P, Ciardullo A. Rotational position of femoral and tibial components in TKA using the femoral transepicondylar axis. *Clin Orthop Relat Res*. 2008;466(11):2751-5. DOI:10.1007/s11999-008-0452-8
11. Luyckx T, Peeters T, Vandenuecker H, et al. Is adapted measured resection superior to gap-balancing in determining femoral component rotation in total knee replacement? *J Bone Joint Surg Br*. 2012;94(9):1271-6. DOI:10.1302/0301-620X.94B9.28670
12. Zinoviev MP, Atmansky IA, Belokobyllov AA, Rimashevskiy DV. Preoperative TKA planning on long-leg hip-knee-ankle radiographs and its impact on postoperative coronal knee alignment. *Traumatology and Orthopedics of Russia*. 2019;25(1):32-40. (In Russ.). Зиновьев М.П., Атманский И.А., Белокобылов А.А., Римашевский Д.В. Предоперационное планирование по телерентгенограммам при тотальном эндопротезировании коленного сустава и его значимость для воссоздания нейтральной оси конечности во фронтальной плоскости. *Травматология и ортопедия России*. 2019;25(1):32-40. DOI:10.21823/2311-2905-2019-25-1-32-40
13. Stiehl JB, Abbott BD. Morphology of the transepicondylar axis and its application in primary and revision total knee arthroplasty. *J Arthroplasty*. 1995;10(6):785-9. DOI:10.1016/s0883-5403(05)80075-0

14. Arima J, Whiteside LA, McCarthy DS, White SE. Femoral rotational alignment, based on the anteroposterior axis, in total knee arthroplasty in a valgus knee. A technical note. J Bone Joint Surg Am. 1995;77(9):1331-4. DOI:10.2106/00004623-199509000-00006
15. Gurazhev MB, Lukinov VL, Baitovet VS, et al. Predictors of early aseptic loosening of prosthetic components following primary total knee arthroplasty. Traumatology and Orthopedics of Russia. 2025;31(3):35-49. (In Russ.). Гуражев М.Б., Лукинов В.Л., Байтов В.С. и др. Предикторы раннего асептического расшатывания компонентов эндопротеза при первичном эндопротезировании коленного сустава. Травматология и ортопедия России. 2025;31(3):35-49. DOI:10.17816/2311-2905-17595
16. Khominets VV, Gaivoronskiy IV, Kudyashev AL, et al. Experimental substantiation of the optimal technique for choosing the rotation of the femoral component of the knee endoprosthesis. Bulletin of the Russian Military Medical Academy. 2021;23(1):129-34. (In Russ.). Хоминец В.В., Гайворонский И.В., Кудяшев А.Л. и др. Экспериментальное обоснование оптимальной техники выбора ротации бедренного компонента эндопротеза коленного сустава. Вестник Российской военно-медицинской академии. 2021;23(1):129-34. DOI:10.17816/brmma.63630
17. Ollivier B, Vandenuecker H, Vermue H, Luyckx T. A robotic-assisted simulation of kinematic alignment in TKA leads to excessive valgus and internal rotation in valgus knees. Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc. 2023;31(11):4747-54. DOI:10.1007/s00167-023-07504-x
18. Lychagin AV, Griitsyuk AA, Kalinsky EB, et al. Kinematic alignment in robotic total knee arthroplasty. Genij Ortopedii = Genius of Orthopedics. 2024;30(6):845-54. (In Russ.). Лычагин А.В., Гриццук А.А., Калинин Е.Б. и др. Кинематическое выравнивание при роботизированном тотальном эндопротезировании коленного сустава. Гений ортопедии. 2024;30(6):845-54. DOI:10.18019/1028-4427-2024-30-6-845-854
19. Nam JH, Koh YG, Kim PS, et al. The femoral trochlear anterior line is a better alternative intra-operative reference compared to femoral anterior tangent line for femoral rotation in both genders in total knee arthroplasty. J Exp Orthop. 2020;7(1):43. DOI:10.1186/s40634-020-00259-1
20. Ji HM, Jin DS, Han J, et al. Comparison of alternate references for femoral rotation in female patients undergoing total knee arthroplasty. Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc. 2016;24(8):2402-6. DOI:10.1007/s00167-015-3506-y

Статья поступила в редакцию 25.01.2026; одобрена после рецензирования 24.02.2026; принята к публикации 06.03.2026.
The article was submitted 25.01.2026; approved after reviewing 24.02.2026; accepted for publication 06.03.2026.

Информация об авторах:

Роман Андреевич Зубавленко – врач – травматолог-ортопед травматолого-ортопедического отделения №2, младший научный сотрудник отдела клинической и экспериментальной травматологии и ортопедии Научно-исследовательского института травматологии, ортопедии и нейрохирургии, sarniiton@yandex.ru, ORCID 0000-0001-8225-1150; **Владимир Владимирович Островский** – директор Научно-исследовательского института травматологии, ортопедии и нейрохирургии, доцент, доктор медицинских наук, ostrw@mail.ru, ORCID 0000-0002-8602-2715; **Олег Юрьевич Воскресенский** – заведующий травматолого-ортопедическим отделением №2 Научно-исследовательского института травматологии, ортопедии и нейрохирургии, кандидат медицинских наук, vos-oleg@yandex.ru, ORCID 0009-0000-7067-2556.

Information about the authors:

Roman A. Zubavlenko – Trauma Orthopedist of the Traumatological and Orthopedic Department No. 2, Junior Researcher of the Department of Clinical and Experimental Traumatology and Orthopedics of the Scientific Research Institute of Traumatology, Orthopedics and Neurosurgery, sarniiton@yandex.ru, ORCID 0000-0001-8225-1150; **Vladimir Yu. Ostrovskij** – Director of the Scientific Research Institute of Traumatology, Associate Professor, DSc, ostrw@mail.ru, ORCID 0000-0002-8602-2715; **Oleg Yu. Voskresenskij** – Head of the Traumatological and Orthopedic Department No. 2 of the Scientific Research Institute of Traumatology, Orthopedics and Neurosurgery, PhD, vos-oleg@yandex.ru, ORCID 0009-0000-7067-2556.

УДК 616.5-089-74 +616.003.93

EDN: ILIQOC

<https://doi.org/10.15275/ssmj2201031>

Оригинальная статья

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ОБРАЗЦОВ ИМПЛАНТАТОВ С РАЗНЫМИ ТИПАМИ ПОКРЫТИЙ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ *IN VIVO*

Г.П. Котельников, Л.Т. Волова, А.Н. Николаенко, Д.А. Долгушкин, В.В. Иванов, А.П. Борисов

ФГБОУ ВО «Самарский государственный медицинский университет» Минздрава России, Самара, Россия

RESEARCH OF EXPERIMENTAL SAMPLES OF IMPLANTS WITH DIFFERENT TYPES OF COATINGS IN AN EXPERIMENT *IN VIVO*

G.P. Kotelnikov, L.Th. Volova, A.N. Nikolaenko, D.A. Dolgushkin, V.V. Ivanov, A.P. Borisov

Samara State Medical University, Samara, Russia

Для цитирования: Котельников Г.П., Волова Л.Т., Николаенко А.Н., Долгушкин Д.А., Иванов В.В., Борисов А.П. Исследование экспериментальных образцов имплантатов с разными типами покрытий в эксперименте *in vivo*. Саратовский научно-медицинский журнал. 2026; 22 (1): 31-38. EDN: ILIQOC. <https://doi.org/10.15275/ssmj2201031>

Аннотация. Цель: оценка безопасности и остеоинтегративных свойств экспериментальных образцов имплантатов с разными типами покрытий в эксперименте *in vivo* у крыс. **Материал и методы.** Морфологическое исследование выполнено на 60 лабораторных половозрелых крысах. Материалами исследования являлись образцы имплантатов 4 групп с различными типами покрытий на основе титана ВТ6. **Результаты.** Доказана биологическая совместимость всех образцов имплантатов. В группе имплантатов без покрытия не наблюдали выраженного костеобразования, стабильность имплантата сохранялась низкой ко 2-му месяцу (2,9±1,1 балла по шкале стабильности имплантата). Имплантаты с покрытием хитозаном показали невысокие показатели стабильности (1,8±0,1 балла ко 2-й неделе), однако наблюдалась выраженная стимуляция остеогенеза.