

Эндопротезирование коленного сустава с помощью робота: преимущества, недостатки, перспективы (обзор литературы)

Г.А. Айрапетов^{1,3,4}, Н.В. Загородний^{1,2}, А.Х.А. Аль Кафавин¹, А.А. Данильянц¹, П.К. Яблонский^{4,5}, В.У. Яцукова⁶

¹Российский университет дружбы народов им. Патриса Лумумбы, Москва

²Национальный медицинский исследовательский центр травматологии и ортопедии им. Н.Н. Приорова, Москва

³Городская клиническая больница № 31 им. акад. Г.М. Савельевой Департамента здравоохранения г. Москвы

⁴Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт фтизиопульмонологии

⁵Санкт-Петербургский государственный университет

⁶Южно-Уральский государственный медицинский университет, Челябинск

Total knee arthroplasty with robot-assisted technology: advantages, disadvantages, perspectives (review)

G. Airapetov^{1,3,4}, N. Zagorodnyi^{1,2}, A. Al Kafavin¹, A. Daniliants¹, P. Yablonskiy^{4,5}, V. Yatsukova⁶

¹Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba, Moscow

²National Medical Research Centre for Traumatology and Orthopaedics named after N.N. Priorov, Moscow

³City Clinical Hospital N 31 named after academician G.M. Savelyeva, Moscow Department of Healthcare

⁴St. Petersburg Scientific Research Institute of Phthisiopulmonology

⁵St. Petersburg State University

⁶South Urals State Medical University, Chelyabinsk

© Коллектив авторов, 2025 г.

Аннотация

Тотальная артропластика коленного сустава является распространенной ортопедической операцией, которая рутинно выполняется во всем мире при выраженном болевом синдроме и ограничении функции сустава, вызванном остеоартритом или другими дегенеративными заболеваниями. Методика демонстрирует высокую эффективность восстановления функции сустава и возвращения пациентов к повседневной

деятельности. Рост числа больных остеоартритом, а также старение населения ведут к ежегодному увеличению количества операций по замене коленного сустава во всем мире. В последние годы популярность набирают роботизированные системы. Роботические установки обеспечивают высокую точность позиционирования компонентов при наименьшей травматизации мягких тканей, обратную связь в режиме реального времени, а также учитывают анато-

мические особенности конкретного пациента. Недостатками технологии являются потенциально большая длительность операции, затраты на оборудование и обучение персонала, неясные преимущества с точки зрения долгосрочных клинических результатов. Наш опыт применения роботических технологий для эндопротезирования коленного сустава также показал сопоставимый с традиционным вмешательством функциональный результат при выполнении механического выравнивания в краткосрочной перспективе с меньшей распространенностью интраоперационных осложнений. Требуется проведение дальнейших исследований для расширения отечественного опыта робот-ассистированного эндопротезирования и широкого внедрения технологии в клиническую практику.

Ключевые слова: тотальная артропластика, коленный сустав, эндопротезирование, роботизированная система, робот-ассистированные технологии

Summary

Knee arthroplasty is a common orthopaedic surgery, which is routinely performed worldwide for severe pain syndrome and limitation of joint function caused by osteoarthritis or other degenerative diseases. The technique

has been shown to be highly effective in restoring joint function and returning patients to their daily activities. The growing impact of osteoarthritis and the aging population is leading to an annual increase in the number of knee replacement surgeries worldwide.

In recent years, robotic systems have become increasingly popular, offering potential advantages in accuracy and reproducibility of surgical technique compared to traditional manual intervention. Robot-assisted arthroplasty provides high accuracy of component positioning with the least amount of soft tissue trauma, real-time feedback, and takes into account the anatomical features of the individual patient. The disadvantages of the technology are the potential duration of the operation, equipment and training costs, and unclear benefits in terms of long-term clinical outcomes. Our experience with robotic technology for knee arthroplasty has also shown comparable short-term functional outcome to conventional intervention, with a lower incidence of intraoperative complications. Further studies are required to expand the domestic experience of robot-assisted endoprosthesis and to widely introduce the technology into clinical practice.

Keywords: total arthroplasty, knee, robotic system, robot-assisted technology, robotic system

Введение

В настоящее время классическая мануальная тотальная артропластика коленного сустава считается общепринятым, безопасным и экономически эффективным вмешательством. Эндопротезирование доказало свою эффективность в устранении прогрессирующей боли, восстановлении нормальной функции прооперированного сустава, что позволяет пациентам вернуться к повседневной жизнедеятельности и значительно улучшить качество их жизни [1].

Показания к эндопротезированию определяют сочетанием факторов, включающими степень повреждения сустава, интенсивность болевого синдрома и эффективность консервативных методов лечения. Наиболее распространенной причиной является дегенеративно-дистрофические изменения сустава, вызванные остеоартритом, который развивается как без какой-либо очевидной причины, чаще всего из-за возраста, избыточной массы тела, генетической предрасположенности; так и на фоне ревматоидного, инфекционного или псориатического поражения, травматического воздействия, рахита, подагры, хондрокальциноза, гемохроматоза, болезни Вильсона, акромегалии, врожденной аномалии развития конечности. К замене сустава также прибегают на терминальных стадиях аваскулярного некроза [2].

Тотальное эндопротезирование коленного сустава (ТЭКС) остается одной из наиболее часто выполняемых ортопедических операций во всем мире, с прогнозируемым ежегодным ростом в 85% [3]. В особенности, ТЭКС показывает значительный рост в развитых странах [4]. В первую очередь это связывают с растущей распространенностью и экономическим влиянием остеоартрита на различные категории населения [5].

Осложнения ТЭКС включают перипротезные переломы, которые в дистальном отделе бедренной кости встречаются с частотой от 1% до 2%. Частота перипротезных переломов большеберцовой кости составляет от 0,5% до 1%; распространенность перипротезных переломов надколенника варьируют от 0,2% до 20%. Спектр осложнений также включает поверхностные хирургические инфекции, расхождение краев раны или замедленное заживление раны, асептическую нестабильность, относятся разрыв или повреждение разгибательного механизма, синдром щелчка надколенника, повреждение сосудов и кровотечение, паралич малоберцового нерва, гиперчувствительность к компонентам импланта и цементной мантии, гетеротопическое окостенение [6].

Цель исследования

Обобщить зарубежный и отечественный опыт применения роботизированной тотальной артропластики

коленного сустава, а также представить собственный опыт проведения ТЭКС с помощью роботизированных технологий.

Материалы и методы исследования

Проведен анализ литературы в следующих электронных научных базах: PubMed, Cochrane Library, Springer, Scopus, Киберленинка, elibrary.ru — за период с 2007 по 2025 г. В обзор были включены оригинальные результаты исследований, обзоры, метаанализы. Редакционные статьи, тезисы конференций, письма в редакцию были исключены. Протоколы исследований, промежуточные результаты продолжающихся исследований были учтены. Ключевые слова, используемые для определения условий участия в обзоре: «тотальная артропластика», «коленный сустав», «эндопротезирование», «роботизированная система», «робот-ассистированные технологии». Приоритет был отдан статьям, опубликованным в течение трех и пяти лет до написания обзора, а также оригинальным исследованиям, изучающим эффективность применения роботизированных систем нового поколения.

Результаты исследования

Подходы к совершенствованию тотальной артропластики коленного сустава

Методики выполнения тотальной артропластики коленного сустава активно совершенствовались и за несколько десятилетий претерпели значительные изменения. Важной задачей эндопротезирования является сочетание правильного позиционирования имплантатов, восстановление механической оси и балансировка сгибательной и разгибательной щелей, что обеспечивает хорошие функциональные результаты и высокую выживаемость эндопротеза в отдаленном периоде.

С целью достижения предоперационных целей при выравнивании механической оси конечности и для измерения медиолатеральных щелей до, во время и после установки имплантатов были предложены навигационные установки [7]. На ранних этапах применения оптической компьютерной навигации для диагностики анатомических ориентиров и механической оси предполагалось, что метод позволит повысить точность установки компонентов эндопротеза и снизить частоту повторных ревизионных вмешательств. Однако была отмечена недостаточная точность навигационных систем — предоперационный план позиционирования имплантатов в 5% случаев [8]. Кроме того, клинический результат у пациентов после использования компьютерной навигации при замене коленного

сустава не отличался от результата традиционного вмешательства через 2 года, а также через 5 лет после операции [9, 10]. Навигация потенциально улучшает точность послеоперационного выравнивания оси конечности и ориентацию компонентов, однако не было найдено различий в ранней реабилитации пациентов [11].

Другим направлением совершенствования результатов эндопротезирования является изготовление индивидуальных направляющих с помощью 3D-печати на основе предоперационной визуализации с помощью компьютерной или магнитно-резонансной томографии [12]. Однако в настоящее время все еще отмечается недостаточная точность этих систем; до 30% процедур не могут быть завершены с помощью персонифицированного инструментария из-за интраоперационных препятствий [13]. Согласно Yan и соавт., не обнаружено значимого рентгенологического и клинического преимущества использования данного подхода в сравнении мануальной техникой или навигационными системами, помимо объема дополнительных расходов и времени ожидания пациентом получения хирургической процедуры [14].

На данный момент ведется поиск альтернативных методов выравнивания при тотальной артропластике коленного сустава, таких как анатомическое, отрегулированное механическое, кинематическое и ограниченное кинематическое, с последующим исследованием функциональных результатов в сравнении с традиционным механическим выравниванием [15, 16]. Совершенствуются методы наложения швов для подбора наиболее быстрого, безопасного, эффективного и экономически выгодного при тотальном эндопротезировании коленного сустава [17].

Изучается потенциал искусственного интеллекта (ИИ) в качестве дополнения к планированию ТЭКС. Рассматривается множество вариантов применения ИИ в области тотальной артропластики коленного сустава, от предоперационного планирования до послеоперационного ухода и мониторинга [18]. Показана достаточная надежность ИИ, сопоставимая с точностью мануальных методов в измерении размера имплантатов; при прогнозировании продолжительности пребывания в стационаре, расходов на лечение, а также в анализе рентгенограмм и классификации остеоартрита коленного сустава с использованием предоперационных снимков с такой же точностью, как у опытного хирурга [19, 20]. Кроме того, продемонстрирована способность ИИ использовать демографические данные пациента, включая пол, рост, массу тела, возраст и этническую принадлежность, для прогнозирования размера имплантата с большей точностью с учетом анатомических различий пациентов, по сравнению с рентгенологическим прогнозированием [18, 21, 22].

Несмотря на то что традиционные методы эндопротезирования коленного сустава на протяжении длительного времени демонстрируют достаточную эффективность и воспроизводимость, примерно в 20% случаев сохраняется послеоперационная неудовлетворенность среди пациентов по различным причинам [23, 24]. По другим данным, от 1 до 5 пациентов, перенесших тотальное эндопротезирование коленного сустава, могут выражать недовольство результатами [6].

На удовлетворенность оперативным вмешательством влияет баланс мягких тканей, позиционирование имплантатов, а также интенсивность и продолжительность послеоперационной боли. Снижение показателей удовлетворенности также связывают с ухудшением функции коленного сустава и необходимостью повторного вмешательства в результате неправильного расположения компонентов или дисбаланса мягких тканей коленного сустава, а постоянная боль после артропластики может ухудшать функциональный прогноз [2].

Кроме того, в сложных клинических случаях точное выравнивание компонентов с помощью традиционного эндопротезирования может быть затруднительно [5]. Для устранения потенциальных неточностей в позиционировании и выравнивании имплантатов и повышения удовлетворенности пациентов были предложены роботизированные системы при тотальной артропластике коленного сустава.

Роботические технологии в эндопротезировании коленного сустава

Применение первых роботических систем для тотальной артропластики сопровождалось рядом сложностей, связанных с техническими сбоями в работе установок. Значительное увеличение длительности хирургической процедуры, высокая частота осложнений, низкая экономическая эффективность стали причиной ограниченного внедрения в рутинную клиническую практику ранних роботизированных технологий при тотальной артропластике [25].

В настоящее время усовершенствованные роботические системы для эндопротезирования суставов в мировой практике используются всё чаще [26]. Работа таких установок направлена на точное выравнивание оси с учетом вида выравнивания и детальный анализ анатомической конфигурации пораженной конечности с использованием предоперационного КТ-моделирования или интраоперационной визуализации в режиме реального времени [27].

В клинической практике применяется несколько категорий роботических систем. Пассивные системы основаны либо на компьютерной, либо на навигационной технологии, при использовании которых хирург руководит позиционированием с помощью шарнир-

ной руки [28]. Важным недостатком пассивных систем является отсутствие обратной связи при подготовке костных поверхностей и позиционировании компонентов, а также вероятность человеческой ошибки. Кроме того, не было установлено никаких дополнительных преимуществ в улучшении долгосрочной выживаемости протезов и функциональных результатов при выравнивании компонентов с помощью пассивных установок, что привело к более частому использованию активных и интерактивных полуактивных систем при артропластике коленного сустава [29].

Активные системы — установки, при использовании которых врач обеспечивает хирургический доступ, размещение ретракторов для защиты мягких тканей и прикрепление конечности к фиксированному удерживающему устройству, а хирургические манипуляции робот выполняет самостоятельно, используя данные предоперационного планирования в режиме реального времени [30]. При этом врач сохраняет контроль над автономной работой установки с помощью кнопки аварийного ручного управления на протяжении всего вмешательства [31].

Интерактивные системы подразумевают взаимодействие между врачом и хирургом: полуактивные установки требуют постоянного ввода данных для завершения процедуры [32]; синергетические интерактивные системы основаны на принципе тактильной модели (обратной связи с роботом) и включают программирование механических ограничений [33].

При этом все системы осуществляют артропластику по приблизительно одинаковой схеме: предоперационное планирование, подключение роботизированной системы, выполнение костных опилов, навигационное позиционирование компонентов и оценка мягкотканного баланса [34].

Многочисленные исследования показали надежность роботической технологии с точки зрения повышения точности позиционирования компонентов и выравнивания оси конечности по сравнению с традиционной мануальной техникой артропластики.

Роботическая артропластика сопряжена с более точным восстановлением линии сустава, что показано в большинстве опубликованных работ вне зависимости от поколения робота. При роботизированной артропластике с помощью ранней платформы отклонение >5 мм было зафиксировано у 3,2% пациентов, тогда как в группе мануального протезирования данный параметр составил 20,6% [35].

Анализ результатов применения систем нового поколения показал, что общего механического выравнивания в пределах $\pm 3^\circ$ от нейтральной механической оси удалось достичь в 94,7% случаев против 84,4% в группе мануальной хирургии, а среднее изменение линии сустава составило 3,6 мм и 5,5 мм соответственно [36].

Ряд метаанализов также сообщил о превосходстве роботизированной артропластики в точности выравнивания компонентов и имплантации протеза, положении имплантатов при отсутствии достоверных различий в анализе длительности операции, диапазона движений и частоты осложнений между роботическим и мануальным вмешательством [5, 33, 37, 38].

Однако сообщается о неудовлетворительной точности при артропластике с помощью роботической системы ROSA (Zimmer), в частности сагиттального выравнивания бедренного и большеберцового компонентов в 77 и 74%. Интраоперационный анализ показал высокую точность позиционирования компонентов в коронарной плоскости [39]. При этом у категории больных с тяжелыми деформационными изменениями нижних конечностей восстановление механической оси с применением роботической установки было несколько лучше [40].

Также было показано, что точное позиционирование протеза уменьшает длительность послеоперационной боли и обеспечивает лучшее функциональное восстановление по сравнению с мануальным эндопротезированием [41]. Сообщается, что в течение первого года после роботизированной операции наблюдается клинически значимое снижение боли по сравнению с традиционной артропластикой [42].

Анализ походки показал сопоставимые результаты между роботизированным и традиционным протезированием, включая общее увеличение нагрузки на заднюю часть стопы на прооперированную конечность, общее время шага и длину шага [41, 43].

В ряде работ оценивалась удовлетворенность больных после роботизированной тотальной артропластики. Noveidaei и соавт. (2024) отмечают, что уровень удовлетворенности после робот-ассистированного эндопротезирования составляет 95%, а для традиционной артропластики этот показатель составил 91%, но без статистически достоверных различий в краткосрочной и среднесрочной перспективах [24].

X.D. Wu и соавт. (2023) также не обнаружили различий в послеоперационной удовлетворенности пациентов после роботизированной операции в сравнении с мануальной классической техникой [44].

Однако роботизированная артропластика показала значительное улучшение показателей по шкале KOOS-JR через 4–6 нед после замены сустава по сравнению с традиционным протезированием [45]. Аналогичный результат был получен при оценке с помощью шкалы Лайкерта: 94% пациентов после роботизированной артропластики были удовлетворены результатом вмешательства против 82% у пациентов традиционной хирургии [46].

N.D. Clement и соавт. (2023) не обнаружили статистически значимых различий в функционировании

сустава, удовлетворенности пациентов, через 6 мес после операции, лишь интенсивность болевого синдрома в прооперированном коленном суставе через 2 и 6 мес была ниже в группе роботизированного эндопротезирования [47]. Аналогично, O. Adamska и соавт. (2023) не обнаружили различий при анализе исходов операции, интенсивности боли, диапазона движений, выравнивании бедренного компонента, а также при оценке продолжительности операции, объема кровопотери, частоты осложнений и с точки зрения экономической эффективности [48].

В литературе доступны данные о выживаемости после роботизированной артропластики преимущественно при использовании ранних роботических установок, в частности системы ROBODOC. Данные об оценке выживаемости с помощью новых роботических систем несколько скуднее. Для более ранних систем после роботизированной операции выживаемость через 10 лет варьирует в пределах 97,4–97% [49–51]. H.Y. Yang и соавт. (2017) сообщают, что совокупные 5- и 10-летние показатели выживаемости после робот-ассистированной замены коленного сустава превысили таковые в группе мануального ТЭТС на 0,9 и 4,8% соответственно [52].

Для систем новой генерации также получены ранние многообещающие показатели выживаемости: 95 и 99% при среднем наблюдении от 19 до 27 мес [53–55].

Исследование сроков возвращения к активной жизни продемонстрировало, что 38% больных после выполнения роботического вмешательства вернулись к работе в течение 3 нед, а 90% были полностью заняты повседневными делами, включая управление автомобилем через 2 мес после замены сустава [56].

Основными недостатками использования роботических систем являются стоимость самих установок; необходимость и вариативная длительность обучения медицинского персонала; чаще всего крупные габариты роботических систем, требующие просторной операционной, а также увеличение продолжительности оперативного вмешательства [57].

Высокая частота осложнений, таких как поверхностное пин-ассоциированное инфицирование, разрыв связки надколенника, надмыщелковый перелом и повреждение малоберцового нерва, была зафиксирована при использовании ранних установок [28]. Эти осложнения связывают с техническими неисправностями предшествующих роботических систем и меньшим размером разреза, который применялся на начальных этапах обучения. Частота перипротезных переломов варьирует от 0,065 до 1,3% и также приписывается установке бикортикальных штифтов при использовании ранних роботических систем. При применении уникортикальных штифтов не было выявлено ни одного случая осложнений, связанных со штифтом [58].

Согласно ретроспективному анализу M. Held и соавт. (2022), распространенность инфекций после робот-ассистированной артропластики составляет 0,47% [59].

Два систематических обзора, посвященных анализу распространенности инфекций заявили, что частота после применения робота составляет 1,6–1,7% по сравнению с 0,44–1,00% при традиционном протезировании [38, 60]. Однако данные обзоры опирались на ограниченное количество сравнительных исследований и включали результаты применения более ранних роботических систем. В недавней работе M. Yuan и соавт. (2024) не было зарегистрировано интраоперационных осложнений, случаев перипротезного перелома, инфекции, тугоподвижности суставов или вторичной госпитализации [41]. Об аналогичных показателях при регистрации осложнений сообщается в ряде других исследований, проводимых с использованием роботических установок различных производителей [61, 62].

Исследования частоты интраоперационного кровотечения показывают противоречивые результаты: часть авторов указывает на увеличение кровопотери, связанной с более длительным временем операции и большим воздействием на окружающие ткани [63, 64], другие заявляют о более низком объеме интраоперационного кровотечения после роботической замены сустава [65].

Ранние исследования по оценке длительности процедуры показали увеличение продолжительности вмешательства при роботических операциях. Позднее было отмечено, что время роботической процедуры значительно сокращается по мере увеличения опыта хирургов. При этом «кривая обучения» отличается от исследования к исследованию и зависит от используемой роботической установки, в особенности от принадлежности к активному или полуактивному типу [66].

Результаты применения роботизированных технологий при ТАКС в России и собственный опыт

Отечественными авторами также представлен ряд работ, описывающих результаты использования роботического эндопротезирования тазобедренного и коленного суставов.

А.В. Лычагин и соавт. провели анализ 29 роботических операций по тотальной артропластике коленного сустава. Согласно утверждениям авторов, во всех случаях не установлено отклонения механической оси от предоперационного плана более чем на 1°, что говорит о высокой клинической эффективности. Помимо точного выравнивания механической оси, показано отсутствие специфичных осложнений во время вмешательства и быстрое возвращение пациентов к оптимальной двигательной активности [67].

Этим же коллективом авторов была проведена рентгенологическая оценка тазобедренно-коленно-голеностопного угла до и после роботизированного эндопротезирования коленного сустава с целью сравнения точности реализации предоперационного планирования по методике кинематического выравнивания оси конечности при робот-ассистированной замене коленного сустава. Роботизированная система продемонстрировала возможность выполнения персонализированного подхода к эндопротезированию и высокую точность реализации плана — кинематическое выравнивание оси нижней конечности с точностью до 2° было получено у 87,3% пациентов [68].

О.В. Пиманчевым и соавт. (2022) было выполнено 14 роботических операций по замене коленного сустава, и 10 — по замене тазобедренного. Авторы заявляют об отклонении компонентов имплантатов от планируемой позиции не более 1,3° и 0,4 мм без развития интраоперационных и ранних послеоперационных осложнений. Также отмечается, что эндопротезирование тазобедренного сустава проводилось через передний (миниинвазивный) доступ с сохранением интактности мышечно-сухожильного комплекса тазобедренного сустава, что приводит к низкой интенсивности болевого синдрома и более быстрому восстановлению функции конечности [69].

А.Д. Герасенкова и соавт. (2024) оценили сравнительные результаты лечения с использованием механического и функционального выравнивания при тотальной артропластике коленного сустава с использованием робота МАКО. При этом в раннем послеоперационном периоде значимых отличий не было зарегистрировано, через 3 и 6 мес лучшие результаты наблюдались в группе функционального выравнивания [70].

Сообщается, что новое поколение роботов обеспечивает более быстрое выполнение манипуляций за счет улучшенной маневренности, более простого позиционирования и фиксации, меньших габаритов, удобного интерфейса и автоматизированного предоперационного планирования [68].

Наш собственный опыт применения роботической установки показал, что функциональный результат робот-ассистированной замены сустава аналогичен результату мануального вмешательства при выполнении механического выравнивания. В ходе исследования мы проанализировали длительность операции, объем кровопотери, точность позиционирования компонентов у 20 больных остеоартритом коленного сустава III стадии с варусной деформацией коленного сустава. Кроме того, не было установлено различий в продолжительности операции между группами; роботизированное эндопротезирование обеспечило лучшее позиционирование компонентов в соответствии

с предоперационным планированием, а сохранение закрытых костномозговых каналов при робот-ассистированной технологии повысило безопасность для пациентов за счет снижения интраоперационной кровопотери в сравнении с традиционной артропластикой [57, 71].

Обсуждение результатов

Роботическая артропластика предлагает ряд преимуществ, включая более точную балансировку щелей, позиционирование компонентов, минимальную резекцию костной ткани, низкую степень травматизации мягких тканей, а также обратную связь, оценивающую биомеханику коленного сустава в режиме реального времени. Эндопротезирование с использованием роботов потенциально обеспечивает уменьшение интенсивности послеоперационной боли в краткосрочном периоде, что способствует ускорению реабилитации и сокращению сроков стационарного лечения по сравнению с мануальной операцией [61].

К недостаткам роботической технологии относятся дополнительные затраты на приобретение оборудования, обучение персонала, затраты времени на операцию и неясные преимущества с точки зрения долгосрочных клинических результатов.

Проанализированные статьи по данной теме отличаются продолжительностью наблюдения после вмешательства и проведены с помощью различных платформ. Также исследования имеют небольшие размеры выборки, но в большинстве работ показано, что функциональные результаты роботических процедур превосходят традиционные операции по функциональным результатам. Кроме того, затруднена оцен-

ка роботических систем множества производителей, использующих различные имплантаты, поскольку для изучения долгосрочных показателей выживаемости необходимо учитывать влияние индивидуальной конструкции протеза.

Важным ограничением для внедрения роботических технологий в рутинную практику хирургов-ортопедов является стоимость оборудования и программного обеспечения. В настоящее время дорогостоящие новые технологии доступны преимущественно в крупных хирургических центрах. Экономическая эффективность внедрения роботизированной артропластики изучалась только зарубежными исследователями, мнения которых по этому вопросу значительно различаются. Необходимо проведение дополнительных исследований в отечественных учреждениях для оценки экономической выгоды в рамках российского здравоохранения.

Заключение

Роботические технологии в наше время стали неотъемлемым компонентом современной медицины, а предлагаемые новые генерации роботических систем расширяют перспективы оптимизации тотальной артропластики коленного сустава и могут значительно улучшить результаты хирургического лечения поздних стадий заболеваний суставов. В настоящее время в России уже накоплен некоторый опыт проведения роботического эндопротезирования суставов с использованием различных установок, однако для последующего повсеместного внедрения необходимы дальнейшие исследования с целью оценки долгосрочной эффективности и безопасности технологии, а также экономической выгоды.

Список литературы

1. Балглей А.Г. и др. Частота и структура осложнений при артроскопическом лечении остеоартрита коленного сустава. Вестник Северо-Западного государственного медицинского университета им. И.И. Мечникова 2022; 14 (2): 35–47 [Balgli A.G. et al. The frequency and structure of complications in arthroscopic treatment of osteoarthritis of the knee joint. Bulletin of the I.I. Mechnikov Northwestern State Medical University 2022; 14 (2): 35–47 (In Russ.)].
2. Hsu H., Siwiec R.M. Knee Osteoarthritis. In StatPearls. StatPearls Publishing. 2023.
3. Sloan M., Premkumar A., Sheth N.P. Projected volume of primary total joint arthroplasty in the US 2014 to 2030. J. Bone Jt Surg. Am. 2018; 100 (17): 1455–1460. doi: 10.2106/jbjs.17.01617.
4. Feng B., Zhu W., Bian Y. et al. China artificial joint annual data report. Chin. Med. J. (Engl). 2020; 134 (6): 752–753. doi: 10.1097/CM9.0000000000001196
5. Alrajeb R., Zarti M., Shuia Z. et al. Robotic-assisted versus conventional total knee arthroplasty: a systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials. Eur. J. Orthop. Surg. Traumatol. 2024; 34 (3): 1333–1343. doi: 10.1007/s00590-023-03798-2.
6. Matthew A. et al. Total Knee Arthroplasty Technique. 2024. StatPearls [Internet]. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK499896>.
7. Jones C.W., Jerabek S.A. Current Role of Computer Navigation in Total Knee Arthroplasty. The Journal of arthroplasty 2018; 33 (7): 1989–1993. doi: 10.1016/j.arth.2018.01.027.
8. Miyasaka T. et al. Accuracy of computed tomography-based navigation-assisted total knee arthroplasty: outlier analysis. The Journal of arthroplasty 2017; 1: 47–52. doi: 10.1016/j.arth.2016.05.069.
9. Spencer J.M. et al. Computer navigation versus conventional total knee replacement: no difference in functional results at two years. The Journal of bone and joint surgery. British volume 2007; 89 (4): 477–480. [https://doi: 10.1302/0301-620X.89B4.18094](https://doi.org/10.1302/0301-620X.89B4.18094).
10. Harvie P., Sloan K., Beaver R.J. Computer navigation vs conventional total knee arthroplasty: five-year functional results of a prospective randomized trial. The Journal of arthroplasty 2012; 27 (5): 667–672. e1. doi: 10.1016/j.arth.2011.08.009.

11. *Lüring C. et al.* Minimal invasive and computer assisted total knee replacement compared with the conventional technique: a prospective, randomised trial. *Knee surgery, sports traumatology, arthroscopy: official journal of the ESSKA* 2008; 16 (10): 928–934. doi: 10.1007/s00167-008-0582-2.
12. *Ollivier M. et al.* The John Insall Award: no functional benefit after unicompartmental knee arthroplasty performed with patient-specific instrumentation: a randomized trial. *Clinical Orthopaedics and Related Research®* 2016; 1: 60–68. doi: 10.1007/s11999-015-4259-0.
13. *Cavaignac E. et al.* Evaluation of the accuracy of patient-specific cutting blocks for total knee arthroplasty: a meta-analysis. *International orthopaedics* 2015; 39: 1541–1552. doi: 10.1007/s00264-014-2549-x.
14. *Yan C.H. et al.* Comparison between patient-specific instruments and conventional instruments and computer navigation in total knee arthroplasty: a randomized controlled trial. *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy* 2015; 23: 3637–3645.
15. *Rivière C. et al.* Alignment options for total knee arthroplasty: A systematic review. *Orthopaedics & traumatology, surgery & research: OTSR* 2017; 103 (7): 1047–1056. doi: 10.1016/j.otsr.2017.07.010.
16. *Jenny J.Y., Baldaire F.* The coronal alignment technique impacts deviation from native knee anatomy after total knee arthroplasty. *Knee surgery, sports traumatology, arthroscopy: official journal of the ESSKA* 2023; 31 (4): 1427–1432. doi: 10.1007/s00167-022-07157-2.
17. *Li P. et al.* Barbed suture versus traditional suture in primary total knee arthroplasty: A systematic review and meta-analysis of randomized controlled studies. *Medicine* 2020; 99 (21): e19945. doi: 10.1097/MD.00000000000019945.
18. *Salman L.A. et al.* Reliability of artificial intelligence in predicting total knee arthroplasty component sizes: a systematic review. *Eur. J. Orthop. Surg. Traumatol.* 2024; 34 (2): 747–756. doi: 10.1007/s00590-023-03784-8.
19. *Ramkumar P.N. et al.* Deep learning preoperatively predicts value metrics for primary total knee arthroplasty: development and validation of an artificial neural network model. *J. Arthroplast.* 2019; 34 (10): 2220–2227. doi: 10.1016/j.arth.2019.05.034.
20. *Schwartz A.J. et al.* Can a convolutional neural network classify knee osteoarthritis on plain radiographs as accurately as fellowship-trained knee arthroplasty surgeons? *J. Arthroplast.* 2020; 35 (9): 2423–2428. doi: 10.1016/j.arth.2020.04.059.
21. *Kunze K.N. et al.* Validation and performance of a machine-learning derived prediction guide for total knee arthroplasty component sizing. *Arch. Orthop. Trauma Surg.* 2021; 141 (12): 2235–2244. doi: 10.1007/s00402-021-04041-5.
22. *Verstraete M.A., Moore R.E., Roche M. et al.* The application of machine learning to balance a total knee arthroplasty. *Bone Jt Open* 2020; 1 (6): 236–244. doi: 10.1302/2633-1462.16.Bjo-2020-0056.R1.
23. *Manlapaz D.G. et al.* Risk Factors for Falls in Adults with Knee Osteoarthritis: A Systematic Review. *PMR* 2019; 11 (7): 745–757. doi: 10.1002/pmrj.12066.
24. *Hoveidae A.H. et al.* Robotic assisted Total Knee Arthroplasty (TKA) is not associated with increased patient satisfaction: a systematic review and meta-analysis. *International orthopaedics* 2024; 48 (7): 1771–1784. doi: 10.1007/s00264-024-06206-4.
25. *St Mart J.P., Goh E.L.* The current state of robotics in total knee arthroplasty. *EFORT Open Rev.* 2021; 6 (4): 270–279. doi: 10.1302/2058-5241.6.200052.
26. *Li T. et al.* Robotic systems and navigation techniques in orthopedics: A historical review. *Applied Sciences* 2023; 17: 9768. doi: 10.3390/app13179768.
27. *Lim J.R., Chun Y.M.* Robot-assisted orthopedic surgeries around shoulder joint: where we are? *Biomedical Engineering Letters* 2023; 4: 553–559. doi: 10.1007/s13534-023-00324-5.
28. *Park S.E., Lee C.T.* Comparison of robotic-assisted and conventional manual implantation of a primary total knee arthroplasty. *J. Arthroplast.* 2007; 22: 1054–1059. doi: 10.1016/j.arth.2007.05.036.
29. *Antonios J.K. et al.* Trends in computer navigation and robotic assistance for total knee arthroplasty in the United States: an analysis of patient and hospital factors. *Arthroplast. Today* 2019; 5: 88–95. doi: 10.1016/j.artd.2019.01.002.
30. *Zlotnicki J.P., O'Malley M.J.* Learning curve for robot- and computer-assisted knee and hip arthroplasty. In: *Lonner JH, ed. Robotics in knee and hip arthroplasty.* Cham: Springer International Publishing, 2019: 37–43. doi: 10.1016/j.artd.2019.01.002.
31. *Jinnah A.H. et al.* General concepts in robotics in orthopedics. In: *Lonner J.H., ed. Robotics in knee and hip arthroplasty.* Cham: Springer International Publishing, 2019: 27–35. doi: 10.1016/j.artd.2019.06.005.
32. *Pailhé R.* Total knee arthroplasty: Latest robotics implantation techniques. *Orthopaedics & Traumatology: Surgery & Research* 2021; 107: 102780. doi: 10.1016/j.otsr.2020.102780.
33. *Zhang J. et al.* Robotic-arm assisted total knee arthroplasty is associated with improved accuracy and patient reported outcomes: a systematic review and meta-analysis. *Knee Surg. Sports Traumatol. Arthrosc.* Aug. 2022; 30 (8): 2677–2695. doi: 10.1007/s00167-021-06464-4.
34. *Nogalo C. et al.* Complications and downsides of the robotic total knee arthroplasty: a systematic review. *Knee Surg. Sports Traumatol. Arthrosc.* Mar. 2023; 31 (3): 736–750. doi: 10.1007/s00167-022-07031-1.
35. *Liow M.H.L. et al.* Robot-assisted total knee arthroplasty accurately restores the joint line and mechanical axis. A prospective randomised study. *The Journal of arthroplasty* 2014; 29: 2373–2377. doi: 10.1016/j.arth.2013.12.010.
36. *Thiengwittayaporn S. et al.* Imageless robotic-assisted total knee arthroplasty accurately restores the radiological alignment with a short learning curve: a randomized controlled trial. *Int. Orthop.* 2021; 45 (11): 2851–2858. doi: 10.1007/s00264-021-05179-y.
37. *Ren Y. et al.* Efficacy and reliability of active robotic-assisted total knee arthroplasty compared with conventional total knee arthroplasty: a systematic review and meta-analysis. *Postgrad. Med. J.* 2019; 95 (1121): 125–133. doi: 10.1136/postgradmedj-2018-136190.
38. *Onggo J.R. et al.* Robotic-assisted total knee arthroplasty is comparable to conventional total knee arthroplasty: a meta-analysis and systematic review. *Arch. Orthop. Trauma Surg.* 2020; 140 (10): 1533–1549. doi: 10.1007/s00402-020-03512-5.
39. *Shin C. et al.* Unsatisfactory accuracy of recent robotic assisting system ROSA for total knee arthroplasty. *J. Exp. Orthop.* 2022; 9 (1): 82. doi: 10.1186/s40634-022-00522-7.
40. *Tian R. et al.* Robotic-assisted total knee arthroplasty is more advantageous for knees with severe deformity: a randomized controlled trial study design. *International journal of surgery (London, England).* 2023; 109 (3): 287–296. doi: 10.1097/J59.0000000000000002.
41. *Yuan M. et al.* Safety and Effectiveness of Robotic-Arm Assisted Total Knee Arthroplasty. *Orthopaedic surgery.* 2024; 16 (4): 882–893. doi: 10.1111/os.14008.
42. *Clement N.D. et al.* Patients undergoing robotic arm-assisted total knee arthroplasty have a greater improvement in knee-specific pain but not in function. *The bone & joint journal* 2024; 106-B (5): 450–459. doi: 10.1302/0301-620X.106B5.BJJ-2023-1196.R1.

43. *Ajekigbe B. et al.* Robotic-arm assisted versus manual total knee arthroplasty: Functional gait analysis from a randomised controlled trial. *Journal of biomechanics* 2024; 169: 112112. doi: 10.1016/j.jbiomech.2024.112112.
44. *Wu X.D. et al.* Robotic-assisted revision total joint arthroplasty: a state-of-the-art scoping review. *EFORT Open Rev.* 2023; 8 (1): 18–25. doi: 10.1530/EOR-22-0105.
45. *Khan I.A. et al.* Image-free robotic-assisted total knee arthroplasty results in quicker recovery but equivalent one-year outcomes compared to conventional total knee arthroplasty. *J. Arthroplasty* 2023; 38 (6S): S232–237. doi: 10.1016/j.arth.2023.02.023.
46. *Smith A.F. et al.* Improved patient satisfaction following robotic-assisted total knee arthroplasty. *J. Knee Surg.* 2021; 34 (7): 730–738. doi: 10.1055/s-0039-1700837.
47. *Clement N.D. et al.* Robotic Arm-assisted versus Manual (ROAM) total knee arthroplasty: a randomized controlled trial. *The bone & joint journal* 2023; 105-B (9): 961–970. doi: 10.1302/0301-620X.105B9.BJJ-2023-0006.R.
48. *Adamska O. et al.* Robotic-Assisted Total Knee Arthroplasty Utilizing NAVIO, CORI Imageless Systems and Manual TKA Accurately Restore Femoral Rotational Alignment and Yield Satisfactory Clinical Outcomes: A Randomized Controlled Trial. *Medicina (Kaunas, Lithuania)* 2023; 59 (2): 236. doi: 10.3390/medicina59020236.
49. *Cho K.J. et al.* Robotic versus conventional primary total knee arthroplasty: clinical and radiological long-term results with a minimum follow-up of ten years. *Int. Orthop.* 2019; 43: 1345–1354. doi: 10.1007/s00264-018-4231-1.
50. *Kim Y.H., Yoon S.H., Park J.W.* Does robotic-assisted TKA result in better outcome scores or long-term survivorship than conventional TKA? A randomized, controlled trial. *Clin. Orthop. Relat. Res.* 2020; 478: 266–275. doi: 10.1097/CORR.0000000000000916.
51. *Lee Y.M. et al.* No difference in clinical outcomes and survivorship for robotic, navigational, and conventional primary total knee arthroplasty with a minimum follow-up of 10 years. *Clin. Orthop. Surg.* 2023; 15 (1): 82–91. doi: 10.4055/cios21138.
52. *Yang H.Y. et al.* Robotic Total Knee Arthroplasty with a Cruciate-Retaining Implant: A 10-Year Follow-up Study. *Clin. Orthop. Surg.* 2017; 9 (2): 169–76. doi: 10.4055/cios.2017.9.2.169.
53. *Batailler C. et al.* Improved implant position and lower revision rate with robotic-assisted unicompartmental knee arthroplasty. *Knee Surg. Sport Traumatol. Arthrosc.* 2019; 27: 1232–1240. doi: 10.1007/s00167-018-5081-5.
54. *Battenberg A.K., Netravali N.A., Lonner J.H.* A novel handheld robotic-assisted system for unicompartmental knee arthroplasty: surgical technique and early survivorship. *J. Robot Surg.* 2020; 14: 55–60. doi: 10.1007/s11701-018-00907-w.
55. *Pearle A.D. et al.* Survivorship and patient satisfaction of robotic-assisted medial unicompartmental knee arthroplasty at a minimum two-year follow-up. *Knee* 2017; 24: 419–428. doi: 10.1016/j.knee.2016.12.001.
56. *Bhowmik-Stoker M. et al.* Return to work and driving after robotic arm-assisted total knee arthroplasty. *Arthroplast Today* 2022; 19 (16): 219–223. doi: 10.1016/j.artd.2022.06.002.
57. *Айрапетов Г.А., Яблонский П.К., Сердобинцев М.С. и др.* Робот-ассистированное эндопротезирование коленного сустава. Первый опыт (проспективное рандомизированное исследование). *Гений ортопедии* 2023; 5: 475–480. [Ayrapetov G.A., Yablonsky P.K., Serdobintsev M.S. et al. Robot-assisted knee arthroplasty. First experience (prospective randomized study). *Genius of Orthopedics* 2023; 5: 475–480 (In Russ.)]. doi: 10.18019/1028-4427-2023-29-5-475-480.
58. *Baek J.H. et al.* Distal femoral tracker pin placement prevents delayed pin tract-induced fracture in robotic-assisted total knee arthroplasty: results of minimum 1-year follow-up. *J. Knee Surg.* 2022. doi: 10.1055/s-0042-1749605.
59. *Held M.B. et al.* Imageless robotic-assisted total knee arthroplasty leads to similar 24-month WOMAC scores as compared to conventional total knee arthroplasty: a retrospective cohort study. *Knee Surg. Sports Traumatol. Arthrosc.* 2022; 30 (8): 2631–2638. doi: 10.1007/s00167-021-06599-4.
60. *Mancino F. et al.* Where are We Now and What are We Hoping to Achieve with Robotic Total Knee Arthroplasty? A Critical Analysis of the Current Knowledge and Future Perspectives. *Orthop. Res. Rev.* 2022; 14: 339–349. doi: 10.2147/ORR.S294369.
61. *Kayani B. et al.* Robotic-arm assisted total knee arthroplasty is associated with improved early functional recovery and reduced time to hospital discharge compared with conventional jig-based total knee arthroplasty: a prospective cohort study. *The bone & joint journal* 2018; 100 (7): 930–937. doi: 10.1302/0301-620X.100B7.BJJ-2017-1449.R1.
62. *Bollars P. et al.* Preliminary experience with an image-free handheld robot for total knee arthroplasty: 77 cases compared with a matched control group. *Eur. J. Orthop. Surg. Traumatol.* 2020; 30: 723–729. doi: 10.1007/s00590-020-02624-3.
63. *Stimson L.N. et al.* Evaluation of blood loss in conventional vs MAKOplasty total knee arthroplasty. *Arthroplast. Today* 2022; 19 (16): 224–228. doi: 10.1016/j.artd.2022.06.003.
64. *An H. et al.* A comparative study of short-term effectiveness of “SkyWalker” robot-assisted versus traditional total knee arthroplasty. *Zhongguo Xiu Fu Chong Jian Wai Ke Za Zhi* 2023; 37 (4): 404–409. doi: 10.7507/1002-1892.202212016.
65. *He R. et al.* A newly designed “SkyWalker” robot applied in total knee arthroplasty: a retrospective cohort study for femoral rotational alignment restoration. *Orthop. Surg.* 2022; 14 (8): 1681–1694. doi: 10.1111/os.13365.
66. *Mahure S.A. et al.* Learning curve for active robotic total knee arthroplasty. *Knee Surg. Sports Traumatol. Arthrosc.* 2022; 30 (8): 2666–2676. doi: 10.1007/s00167-021-06452-8.
67. *Лычагин А.В. и др.* Клиническая эффективность и точность выравнивания механической оси при роботизированном тотальном эндопротезировании коленного сустава. *Гений ортопедии* 2023; 5: 487–494. [Lychagin A.V. et al. Clinical efficacy and accuracy of alignment of the mechanical axis in robotic total knee arthroplasty. *The genius of orthopedics* 2023; 5: 487–494 (In Russ.)]. doi: 10.18019/1028-4427-2023-29-5-487-494.
68. *Лычагин А.В. и др.* Первый опыт применения новой генерации активного робота в первичном тотальном эндопротезировании коленного сустава. *Кафедра травматологии и ортопедии* 2024; 1 (55). [Lychagin A.V. et al. The first experience of using a new generation of active robot in primary total knee arthroplasty. *Department of Traumatology and Orthopedics* 2024; 1 (55) (In Russ.)]. doi: 10.17238/2226-2016-2024-1-22-2.
69. *Лиманчев О.В. и др.* Эндопротезирование тазобедренного сустава с использованием роботизированной системы. *Вестник Национального медико-хирургического центра им. Н.И. Пирогова* 2022; 2: 125–128. [Pimanchev O.V. et al. Hip replacement using a robotic system. *Bulletin of the National Medical and Surgical Center named after N.I. Pirogov* 2022; 2: 125–128 (In Russ.)]. doi: 10.25881/20728255_2022_17_2_125.
70. *Герасенкова А.Д. и др.* Ранние результаты первичного робот-ассистированного эндопротезирования коленного сустава с использованием системы Stryker Mako. *Современные проблемы науки и образования* 2024; (2). [Gera-

senkova A.D. et al. Early results of primary robot-assisted knee arthroplasty using the Stryker Mako system. Modern problems of science and education 2024; (2) (In Russ.)). doi: 10.17513/spno.3331.

71. Airapetov G.A., Yablonsky P.K., Serdobintsev M.S. et al. Early results of robot-assisted knee replacement. Journal of orthopaedic reports 2025; 1 (1): doi: 1000362 0.18019/1028-4427-2023-29-5-475-48.

Поступила в редакцию: 29.05.2025 г.

Сведения об авторах:

Айрапетов Георгий Александрович — доктор медицинских наук, профессор, заместитель главного врача по ортопедии и травматологии СПб ГБУЗ «Городская клиническая больница № 31 им. акад. Г.М. Савельевой»; 119415, Москва, ул. Лобачевского, д. 42; профессор кафедры травматологии и ортопедии ФГАОУ ВО «Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы»; 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; ведущий научный сотрудник ФГБУ «Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт фтизиопульмонологии» Минздрава России; 191036, Санкт-Петербург, Лиговский пр., д. 2-4; e-mail: airapetovga@yandex.ru; ORCID 0000-0001-7507-7772;

Загородний Николай Васильевич — доктор медицинских наук, профессор, член-корреспондент РАН, советник директора ФГБУ «Национальный медицинский исследовательский центр травматологии и ортопедии им. Н.Н. Приорова» Минздрава России; 127299, Москва, ул. Приорова, д. 10; заведующий кафедрой травматологии и ортопедии ФГАОУ ВО «Российский университет дружбы народов им. Патриса Лумумбы»; 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; e-mail: zagorodniy51@mail.ru; ORCID 0000-0002-6736-9772;

Аль Кафавин Анджум Хасан Аталлах — аспирант, врач травматолог-ортопед ФГАОУ ВО «Российский университет дружбы народов им. Патриса Лумумбы»; 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; e-mail: anjum.hasan@mail.ru; ORCID 0009-0005-7329-4446;

Данильянц Армен Альбертович — ординатор кафедры травматологии и ортопедии ФГАОУ ВО «Российский университет дружбы народов им. Патриса Лумумбы»; 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; e-mail: armenmts@mail.ru; ORCID 0000-0001-6692-0975;

Яблонский Петр Казимирович — доктор медицинских наук, профессор, заслуженный врач Российской Федерации, директор ФГБУ «Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт фтизиопульмонологии» Минздрава России; 191036, Санкт-Петербург, Лиговский пр., д. 2-4; заведующий кафедрой госпитальной хирургии ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет»; 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., д. 7/9; e-mail: info@spbniiif.ru; ORCID 0000-0003-4385-9643;

Яцукова Варвара Егоровна — ординатор кафедры травматологии и ортопедии ФГБОУ ВО «Южно-Уральский государственный медицинский университет»; 454141, Челябинская область, г. Челябинск, ул. Воровского, д. 64; e-mail: iatsukava.varvara@mail.ru; ORCID 0000-0002-1649-3108.