

УДК 616.728.3-089.28:681.3

<https://doi.org/10.23888/HMJ2025131141-155>

Использование современных роботизированных систем в эндопротезировании коленного сустава

И. М.–Х. Гайрабеков¹ ✉, С. В. Каграманов¹, О. А. Алексанян¹, Н. В. Загородний^{1,2}, М. Р. Хажкасимов¹

¹ Национальный медицинский исследовательский центр травматологии и ортопедии имени Н. Н. Приорова, Москва, Российская Федерация

² Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы, Москва, Российская Федерация

Автор, ответственный за переписку: Гайрабеков Исраил Магомед–Хаджиевич, israil951998@gmail.com

АННОТАЦИЯ

Актуальность. В последние годы роботизированное эндопротезирование коленного сустава приобретает всё большую актуальность благодаря своему потенциалу в улучшении клинических исходов и снижении рисков осложнений. Внедрение роботизированных систем (РС) в хирургическую практику позволило повысить точность установки имплантатов, что имеет ключевое значение для восстановления нормальной функции сустава.

Цель. Провести анализ использования современных РС в эндопротезировании коленного сустава (ЭКС) на основе имеющихся литературных источников.

Материалы и методы. В процессе исследования был осуществлён поиск в базах данных MEDLINE, CyberLeninka, Mendeley, Web of Science и EMBASE с целью включения в анализ клинических исследований, обзорных статей и мета-анализов, затрагивающих темы тотального ЭКС как традиционными, так и роботизированными методами у людей. РС предоставляют хирургам поддержку при выполнении костных опилов и обеспечивают постоянную обратную связь во время операции, что позволяет достичь оптимальной кинематики сустава и баланса мягких тканей. Точные данные о положении и движении инструментов минимизируют риск неправильной установки имплантатов, т. е. мальпозиции, что является одной из частых причин повторных операций. Различные РС, такие как Cuviv Joint™ и МАКО и др. предлагают уникальные преимущества и функциональные возможности, каждая из которых имеет свои особенности применения и ограничения.

Заключение. Внедрение роботизированных технологий в ЭКС представляет собой значительный прогресс в ортопедической хирургии. Дальнейшие исследования и накопление клинического опыта помогут оптимизировать применение этих систем, что, вероятно, приведет к улучшению долгосрочных результатов лечения пациентов.

Ключевые слова: коленный сустав; роботизированное эндопротезирование коленного сустава; имплантаты; ранний послеоперационный период

Для цитирования:

Гайрабеков И. М.–Х., Каграманов С. В., Алексанян О. А., Загородний Н. В., Хажкасимов М. Р. Использование современных роботизированных систем в эндопротезировании коленного сустава // Наука молодых (Eruditio Juvenium). 2025. Т. 13, № 1. С. 141–155. <https://doi.org/10.23888/HMJ2025131141-155>.

<https://doi.org/10.23888/HMJ2025131141-155>

Use of Modern Robotic Systems in Knee Arthroplasty

Israil M.–Kh. Gayrabekov¹ ✉, Sergey V. Kagramanov¹, Hovakim A. Aleksanyan¹,
Nikolay V. Zagorodniy^{1,2}, Mukhamed R. Khazhkasimov¹

¹ National Medical Research Center of Traumatology and Orthopedics named after N. N. Priorov, Moscow, Russian Federation

² Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba, Moscow, Russian Federation

Corresponding author: Israil M.–Kh. Gayrabekov, israil951998@gmail.com

ABSTRACT

INTRODUCTION: In recent years, robot-assisted total knee replacement is gaining increasing significance due to its potential in improving clinical outcomes and reducing the risk of complications. The introduction of robotic systems (RSs) in surgical practice permitted to improve the accuracy of implant placement, which is of key significance for restoring the normal joint function.

AIM: To analyze the use of modern RSs in the knee arthroplasty (KA) based of the available literature sources.

MATERIALS AND METHODS: In the course of study, a search was conducted in the MEDLINE, CyberLeninka, Mendeley, Web of Science and EMBASE databases for clinical studies, review articles and meta-analyses that addressed the topic of total knee arthroplasty in humans using both conventional and robot-assisted methods. RSs provide support to surgeons in bone cutting and ensure continuous feedback during surgery permitting to achieve the optimal kinematics of the joint and soft tissue balance. Accurate information about position and movement of instruments minimizes the risk of implant malposition, which is a common cause of reoperations. Different RSs, such as Cuvis Joint™ and MAKO among others, offer unique advantages and functionalities, each having particular applications and limitations.

CONCLUSION: The introduction of robot-assisted technologies in knee arthroplasty represents a significant progress in orthopedic surgery. Further research and accumulation of the clinical experience will help optimize application of these systems, which will probably lead to improvement of long-term treatment outcomes.

Keywords: *knee joint; robot-assisted knee arthroplasty; implants; early postoperative period*

For citation:

Gayrabekov I. M.–Kh., Kagramanov S. V., Aleksanyan H. A., Zagorodniy N. V., Khazhkasimov M. R. Use of Modern Robotic Systems in Knee Arthroplasty. *Science of the young (Eruditio Juvenium)*. 2025;13(1):141–155. <https://doi.org/10.23888/HMJ2025131141-155>.

Список сокращений

КТ — компьютерная томография
ОХ — ортопедическая хирургия
РС — роботизированная система
РТ — роботизированная технология

РЭКС — роботизированное эндопротезирование коленного сустава
ТЭКС — тотальное эндопротезирование коленного сустава
ЭКС — эндопротезирование коленного сустава

Актуальность

Тотальное эндопротезирование коленного сустава (ТЭКС) является решением проблемы тяжелой ортопедической патологии коленного сустава, благодаря среднесрочным и долгосрочным преимуществам для качества жизни, разрешения боли и функционального восстановления пациентов [1]. Начиная с середины XX в. разрабатывались более точные хирургические методы и создавались биосовместимые, долговечные материалы. В начале XXI в. в хирургии эндопротезирования начали применять робототехнику [2–5]. ТЭКС существенно продвинулось за последние годы, став одним из самых распространенных оперативных вмешательств в области ортопедической хирургии (ОХ) [2, 6, 7]. Несмотря на многочисленные сообщения об успешных клинических исходах, около 20% пациентов продолжают испытывать неудовлетворенность результатами операции [8, 9]. Это привело к разработке роботизированного эндопротезирования коленного сустава (РЭКС), т. е. технологии, популярность которой растет благодаря точности установки имплантатов [2, 10].

РЭКС применяет компьютерную томографию (КТ) для тщательного планирования и выбора имплантатов, что позволяет учитывать индивидуальные анатомические особенности пациента, потенциально улучшая функцию сустава, баланс и долговечность имплантата [9]. Данная методика может обеспечить более точные и менее инвазивные подходы, способствуя меньшему повреждению тканей и ускоренному восстановлению. Поэтому данное исследование является актуальным и важным для будущего развития ОХ, поскольку оно имеет потенциал повысить качество жизни пациентов, снизить риск осложнений и сократить время реабилитации.

Цель. Провести всесторонний анализ использования современных РЭКС с опорой на имеющиеся литературные источники, чтобы оценить их эффективность, безопасность и возможные преимущества по сравнению с традиционными методами лечения.

Материалы и методы

В этом исследовании был проведен поиск информации по базам данных MEDLINE, CyberLeninka, Mendeley, Web of Science и EMBASE с использованием ряда ключевых терминов, таких как «коленный сустав», «роботизированное эндопротезирование коленного сустава», «имплантаты» и «ранний послеоперационный период». Они были выбраны с целью охвата широкого спектра публикаций, связанных с ТЭКС, выполненным как традиционными, так и роботизированными методами.

В процессе отбора статей применялись строгие критерии включения: клинические исследования, статьи, основанные на консенсусе, обзорные статьи и мета-анализы, которые проводились у пациентов, прошедших ТЭКС. Обзор включал исследование различных методологий, освещающие текущее понимание применения РЭКС, эффективность и безопасность таких подходов по сравнению с традиционными методами, а также возможные осложнения. Анализ базировался на источниках с полными текстами публикаций в рецензируемых журналах с высоким импакт-фактором.

Краткая историческая справка

В 1993 г. F. A. Matsen, и др. [10] первыми представили описание системы РЭКС. Их разработка включала в себя роботизированную пилу для точного преобразования геометрии кости и позициони-

рования. Эту инновацию авторы предложили как способ улучшения точности и надежности хирургического вмешательства. В последствии, это заложило основу для дальнейшего развития роботизированных технологий (РТ) в ОХ.

Значительный вклад в 1996 г. внесли Т. С. Kienzle, и др. [2], создав пассивную систему использования предоперационной КТ и техники регистрации на основе штифтов. Предварительное КТ сканирование предоставило хирургу возможность планировать и выполнять установку имплантата с высокой точностью, основываясь на 3D-реконструкции костей. Благодаря такому подходу значительно улучшились результаты операций и сократилось время реабилитации пациентов. Внедрение таких технологий позволило снизить риск осложнений и добиться более стабильных и предсказуемых результатов.

Полуактивная система, в которой робот ограничивает движение режущего инструмента под контролем хирурга, была предложена в 1998 г. G. Van Ham, и др. [3]. Эта система позволяла минимизировать ошибки и улучшить результаты хирургических вмешательств.

В 2000 г. S. M. Martelli, и др. разработали пассивную роботизированную систему (РС), которая базируется на интраоперационной регистрации с применением методов сопоставления, основанных на моделях, созданных по результатам КТ. Система была спроектирована таким образом, чтобы значительно повысить точность операций, минимизируя человеческий фактор и сопутствующие риски. Одним из ключевых преимуществ этой системы была её способность адаптироваться к индивидуальным анатомическим особенностям каждого пациента. Это обеспечивало более высокую точность при установке эндопротезов, снижая вероятность осложнений и обеспечивая лучшие долгосрочные результаты. В ходе клинических испытаний система продемонстрировала высокую надежность и точность, что сделало её ценным инструментом в арсенале хирургов [4].

Аналогичные методы для сопоставления костных структур без использования

контрольных маркеров применили в 1998 г. D. Glozman, и др., а также M. Fadda, и др. Эти методы регистрации интегрировались с активными и полуактивными РС, что позволило выполнять высокоточное фрезерование кости в соответствии с предоперационным планом. Такие решения значительно повысили точность и эффективность хирургических вмешательств, сократив риски и улучшив результаты для пациентов. Введение этих технологий в клиническую практику продолжает формировать будущее ортопедических операций [5, 11].

В дополнение к крупным роботам были сконструированы миниатюрные роботы, которые фиксируются непосредственно на костях. К примеру, PiGalileo (Plus Orthopedics, Smith & Neph, Швейцария) — это пассивная система, использующая РТ с гибридной навигацией, который крепится с обеих сторон дистального отдела бедренной кости по медиолатеральной оси. Соответственно, MBARS (Mini Bone-Attached Robotic System) представлена как активная система, разработанная специально для операций по замене пателлофemorального сустава [12]. В свою очередь, в 2005 г. A. Wolf, и др. представили пассивную систему Praxiteles, которая является миниатюрным роботом, закрепляемым на костях для проведения ТЭКС [13]. В 2009 г. A. M. Song, и др. разработали активную систему HyBAR (Hybrid Bone-Attached Robotic system), которая представляет собой гибридный костный робот для ЭКС, позволяющий создавать структурно устойчивого робота для минимально инвазивных хирургических вмешательств [14]. HyBAR обладает преимуществами за счет своей конструкции, которая обеспечивает надежность и точность при минимально инвазивных хирургических процедурах, что способствует более быстрому восстановлению пациентов и снижению риска осложнений.

Обзор современных РС

Несмотря на то, что множество систем уже разработаны и протестированы в виде прототипов, только небольшое количество из них было эффективно внедрено в клиническую практику на международ-

ном уровне. В их число входит система Cuvis Joint (Curexo Technology Corporation, Сеул, Южная Корея), система NAVIO/CORI (Smith & Nephew, США), интерактивная ортопедическая система МАКО (Surgical Corporation, Форт-Лодердейл, Флорида), ROSA (Zimmer Biomet, Варшава, Индиана, США) и инновационная

система OMNIBOT (OMNIlife Science, Рай-Айленд, США). Системы МАКО и Cuvis Joint классифицируются как полупассивные.

Рассмотрим краткое изложение опубликованных клинических исследований, в которых используются вспомогательные РС для ТЭКС (табл. 1).

Таблица 1. Клинические исследования с использованием роботизированной помощи для тотального эндопротезирования коленного сустава

Авторы	Период	Страна производитель	Роботизированная система	Сравнение роботизированной системы с традиционным методом	Количество использований роботизированных систем	Обычные случаи
Chandra-shekar P., et al. [7]	2023	Южная Корея	CUVIS Joint™	Улучшенная точность установки и повышенная безопасность мягкотканых структур	500	110
Vermue H., et al. [8]	2022	США	МАКО	Улучшенная точность установки и улучшение баланса связок	32	16
Kayani B., et al. [15]	2018	США	МАКО	Улучшенная точность, снижение потребности в послеоперационной обезболивающей терапии, быстрое восстановление, сокращение времени до выписки из больницы	40	40
Savov P., et al. [16]	2021	США	NAVIO	Улучшение точности постановки компонентов, одинаковое время операции после полного освоения роботизированной техники	70	70
Held M. B., et al. [17]	2021	США	NAVIO/CORI	Улучшение баланса между отделами коленного сустава, но увеличение времени операции	49	37
Khlopas A., et al. [18]	2019	США	NAVIO/CORI	Улучшения в ходьбе и положении стоя, стандартных и продвинутых действиях, общей оценке функциональных действий, боли при ходьбе, общей оценке симптомов и удовлетворенности	150	102
Vanlommel L., et al. [19]	2021	США	ROSA	Сокращение послеоперационных осложнений и улучшение точности	180	200
Blum C. L., et al. [20]	2021	США	OMNIBOT	Улучшенная точность постановки компонентов, улучшение результатов по всем шкалам	32	30
Keggi J. M., et al. [21]	2021	США	OMNIBOT	Повышенные функциональные результаты коленного сустава	20	50

Автономная система *Cuvis Joint* — это роботизированная платформа с закрытой архитектурой, работающая на основе анализа изображений. КТ нижней конечности загружается в программное обеспечение для предоперационного планирования (*J planner™*) согласно протоколу, предоставленному производителем. Робот оснащен дополнительным надежным механизмом для повышения безопасности. Система ВММ мониторит процесс фрезерования и при любом отклонении останавливает работу, предотвращая травмы. Оператор может регулировать скорость фрезеровки на протяжении всего процесса. В исследовании Р. Chandrashekar, и др. [8] участвовало 500 пациентов, которым с ноября 2020 г. по ноябрь 2021 г. проводили ТЭКС с использованием системы *Cuvis Joint*. Неврологических повреждений, сосудистых травм, нарушений разгибательного механизма и повреждений медиальной коллатеральной связки не зафиксировано. Был один случай поверхностной ссадины сухожилия надколенника, не потребовавший вмешательства. Операции не прерывались из-за угрозы повреждения мягких тканей. Не было случаев расшатывания штифтов во время операции или стрессовых переломов в местах установки штифтов. Зафиксированы: один случай поломки штифта *Steinmann* и один случай поломки сверла, удаленных без повреждения кости. Таким образом система *Cuvis Joint* для ТЭКС безопасна и не вызывает существенных интраоперационных осложнений.

МАКО является наиболее исследованной среди всех РС, применяемых для ТЭКС [8]. В ряде исследований указывалось на улучшение клинических результатов в течение одного года после операции, снижение потребности в послеоперационной обезболивающей терапии, более быстрое восстановление, сокращение времени до выписки из больницы по сравнению с традиционными методами [15, 22, 23]. Однако долгосрочные клинические данные все еще отсутствуют. Точность выполнения хирургических процедур, достигнутая с использованием этой системы, была вы-

ше по сравнению с традиционными методами, особенно в случае выравнивания оси бедро-колени-лодыжка в коронарном и сагитальном направлениях. Тем не менее, доказанные факты об улучшении клинических результатов за счет точности костных резекций, отсутствуют.

В двух исследованиях сообщалось об улучшении равновесия связок, сбалансированного с помощью робота, в одной из которых отмечена точность до 1 мм разницы между медиальной и латеральной сторонами как при сгибании, так и при разгибании. Через год после операции получен более высокий балл по шкале KPS при использовании сенсорной технологии совместно с платформой МАКО [24, 25]. Для перехода от этапа обучения к этапу повышения квалификации необходимо провести от 7 до 43 наблюдений. При этом уровень подготовки хирурга не оказывал влияния на выравнивание компонентов и баланс. Общее время хирургического вмешательства, от разреза до последнего кожного шва, не имело значительных отличий от обычных методов. В исследовании В. Кауани, и др. после завершения обучающей кривой время настройки робота составляло $9,2 \pm 1,5$ мин. [26]. В проанализированных исследованиях [26–28] не было выявлено различий в частоте осложнений между РЭКС и традиционным ТЭКС. Долгосрочные данные о частоте повторных вмешательств отсутствуют. Примечательно, что в половине включенных исследований, посвященных платформе МАКО, присутствовал потенциальный конфликт интересов.

NAVIO/CORI — эти системы являются инструментами, которые обеспечивают помощь хирургу при выполнении операции по замене коленного сустава, причем они не требуют использования изображений или предварительных сканирований пациента. Несмотря на многообещающие результаты, связанные с высокой точностью установки имплантата и выравнивания конечности для достижения желаемого угла бедро-колени-лодыжка, исследования в этой области остаются

ограниченными [8]. Было проведено исследование М. В. Held, и др., где оценивались клинические результаты. Обнаружили, что эндопротезирование коленного сустава (ЭКС) с помощью робота-хирурга позволяет улучшить баланс между отделами коленного сустава во время операции по сравнению с традиционным ЭКС, но за счет увеличения продолжительности операции (РАТКА) [17].

По данным А. Khlopa и N. Savov, процесс обучения хирургов включает выполнение 7–11 операций [16, 18]. Применение сенсорной технологии в РС показало улучшение баланса суставов по сравнению с традиционными методиками [17]. Также в ряде исследований оценивалось время хирургического вмешательства. Результаты демонстрируют возможное увеличение времени операции при использовании робота NAVIO по сравнению с обычной тотальной артропластикой коленного сустава. Однако данных о сложностях и частоте повторных вмешательств в этих исследованиях не представлено. Важно отметить, что существует потенциальная коллизия интересов, что необходимо учитывать при интерпретации результатов.

РС ROSA (Robotic Surgical Assistant) [8] обеспечивает точное выравнивание конечностей, оптимальное позиционирование имплантатов и балансировку мягких тканей, что способствует улучшению исходов хирургического вмешательства. Все это подчеркивается в исследовании, в котором не были получены данные о клинических исходах или возможных осложнениях. Однако по сравнению с интраоперационным планом система продемонстрировала высокую хирургическую точность. График обучения, касающийся времени проведения операции, показывает, что необходимое время для освоения системы составляет выполнение 6–11 операций. Использование РТ требовало в среднем на 18 дополнительных минут больше, чем традиционное ТЭКС [19]. По данным авторов, РС ROSA представляет собой перспективный инструмент, который требует дальнейших исследований и оптимизации

для максимально эффективного использования в клинической практике.

OMNIBOT — инновационная система, улучшающая точность и результаты ТЭКС. В исследовании С. L. Blum, и др. [20] сравнивались показатели остеоартрита у пациентов, прошедших РЭКС с данными традиционных методов из базы данных национальной программы (FORCE-TJR) по ТЭКС. Существенных различий в результатах (KOOS) не было выявлено. Автоматизированная система Balance Both в OMNIBOT оценивает балансировку суставных щелей, устанавливая разницу в 1,5 мм между разгибанием и сгибанием, в медиально-латеральной суставной щели. В исследовании J. M. Keggi, и др. [21] сравнивалось использование OMNIBOT с прогнозным планом BalanceBot и без него. Прогнозная балансировка увеличила число сбалансированных коленных суставов на 37% (88% против 51%). Эти суставы показали значительное улучшение в баллах KOOS и снижении боли в поясничной области через 3 мес. после операции, а также улучшение симптомов и повседневной активности на всех этапах послеоперационного периода.

Исследование S. W. Young, и др. [29] подчеркивает, что современные РС в хирургии ТЭКС имеют значительные преимущества благодаря их высокой точности в выравнивании конечностей, позиционировании имплантатов и балансировке мягких тканей. Эти системы способны адаптировать хирургическую процедуру к индивидуальной анатомии пациента, что может существенно снизить уровень неудовлетворенности после операции.

Таким образом, для определения лучшей РС на основании данных можно рассмотреть критерии точности, функциональные результаты и операционное время [11–33]. Сравнивая системы Cuvis Joint, MAKO, NAVIO/CORI и ROSA, OMNIBOT можно отметить, что каждая имеет свои уникальные особенности. Система CUVIS Joint зарекомендовала себя высокой безопасностью и точностью в операциях по замене коленного сустава,

демонстрируя минимальное количество интраоперационных осложнений. РС МАКО, являясь наиболее исследованной, показала улучшение клинических результатов через год после операции и высокую точность выполнения хирургических процедур, хотя долгосрочные данные еще отсутствуют. NAVIO/CORI, хотя и не требуют предварительных изображений, продемонстрировали ограниченные результаты в клинических исследованиях и возможное увеличение времени операции. Система ROSA также акцентируется на точности и эффективности, однако требует дальнейших исследований для оценки клинических исходов и времени освоения её использования. В целом, РС МАКО представляется наиболее изученной и показывающей лучшие клинические результаты в краткосрочной перспективе, однако Cuvix Joint демонстрирует значительные преимущества в плане безопасности и точности при проведении операций. OMNIBOT предлагает инновационные подходы к улучшению функциональных исходов, что делает её перспективной для применения в клинической практике.

Преимущества роботизированной замены коленного сустава по сравнению с традиционным методом

Несмотря на высокую стоимость и дополнительные затраты на расходные материалы, робот-ассистированный метод предоставляет множество преимуществ по сравнению с традиционным ручным методом. Среди них можно выделить:

1. точное восстановление оси конечности, даже при наличии внесуставных деформаций;
2. правильное размещение компонентов эндопротеза;
3. уменьшение интраоперационной кровопотери за счет сохранения неповрежденных костномозговых каналов;
4. повышенная безопасность.

Среди недостатков использования робот-ассистированного метода можно также отметить дополнительное облучение пациента при предоперационной КТ, необходимость наличия дорогостоящего

оборудования в операционной, что значительно ограничивает пространство для работы медицинского персонала.

Рассмотрим исследования, которые демонстрируют достижения в точности установки имплантатов, снижении риска осложнений и ускорении восстановления пациентов. Эти исследования подчеркивают, как РТ повышают эффективность и надежность хирургических вмешательств, предлагая новые стандарты в области медицинской помощи.

Для более глубокого понимания этих преимуществ в сравнении с традиционными подходами Х. Фу, и др. [34] провели систематический обзор и метаанализ данных из 12 полнотекстовых статей, охватывающих 2863 пациента. Их исследование было направлено на сравнение РЭКС с традиционным методом мануального эндопротезирования. Анализ включал как рандомизированные контролируемые испытания, так и ретроспективные исследования. Группа пациентов, подвергшихся РЭКС, показала лучшие результаты в отношении улучшения бедренно-большеберцового угла и оценки по «забытому суставу» по сравнению с группой, прошедшей традиционное лечение. Тем не менее операции с использованием РЭКС занимали больше времени. Долгосрочные результаты свидетельствуют о более значительных улучшениях по шкалам KSS и WOMAC в группе традиционного метода. Исследование показало, что РЭКС обладает потенциалом для увеличения точности установки имплантатов и улучшения некоторых клинических показателей. Однако более продолжительное время операции и неопределенные долгосрочные преимущества указывают на необходимость дальнейших исследований для лучшего понимания различий между этими методами. Обзор также подчеркивает важность индивидуального подхода к пациентам, учитывая анатомические различия коленного сустава [34].

Схожее исследование было у Н. Вертмие, и др., которые провели систематический обзор и анализ существующей литературы для оценки удовлетворенности па-

циентов после РЭКС и его сравнения с традиционным методом, опираясь на данные из баз данных, таких как PubMed, Scopus, Web of Science и Cochrane Library. В результате исследования пришли к выводу, что использование РС, таких как МАКО (Stryker), NAVIO (Smith & Nephew), ROBODOC (Curexo), OMNIBotics (Corin) и ROSA (Zimmer Biomet), обеспечивает высокий уровень удовлетворенности пациентов. Хотя РС позволяют достичь несколько более высокой точности в опилах кости и выравнивании компонентов, в общем уровне удовлетворенности пациентов, который составил 94% для роботов и 91% для традиционных методов, значительных различий в краткосрочной и среднесрочной перспективе выявлено не было. Тем не менее авторы подчеркивают необходимость проведения дополнительных исследований для более глубокого понимания долгосрочных преимуществ использования РС [8].

В исследовании J. Zhang, и др. [35] проанализировали существующую литературу, чтобы оценить удовлетворенность пациентов после РЭКС по сравнению с традиционными методами. Авторы изучили такие аспекты, как удовлетворенность пациентов, функциональные результаты, точность компонентов и методы выравнивания, сравнив их в проспективных и ретроспективных исследованиях, и провели метаанализ. Они сравнивали различные факторы, включая точность позиционирования компонентов, функциональные результаты, осложнения и кривую обучения хирургов. В исследовании были рассмотрены такие РС, как МАКО, NAVIO, ROBODOC, OMNIBotics и ROSA. В частности, было выявлено, что РЭКС обеспечивает более высокую точность позиционирования компонентов и незначительное улучшение краткосрочных функциональных результатов по сравнению с традиционными методами, однако значимых различий в частоте осложнений не обнаружено [35].

В другом исследовании провели сравнительный анализ литературы по эффективности и надежности РЭКС в сравнении с традиционным подходом. Включенные в анализ исследования состояли из

рандомизированных контролируемых испытаний и сравнительных нерандомизированных, опубликованных после 2000 г. Всего было проанализировано семь статей, из которых шесть представляли собой рандомизированные контролируемые испытания, а одно — ретроспективное исследование, охватывавшее 486 пациентов и 517 коленных суставов. РС, использованные в исследованиях, включали ROBODOC и CASPAR. Основные результаты исследования показали, что роботизированные операции демонстрируют более высокую точность в определении механического выравнивания и повышенную точность в постановке имплантатов по сравнению с традиционными методами. Более того, при использовании роботизированной хирургии наблюдалось снижение кровопотери. Практическая значимость данного исследования заключается в потенциале РТ улучшить точность и результаты хирургических вмешательств, минимизируя механическое отклонение и способствуя снижению кровопотери [36].

В исследовании, сосредоточенном на рандомизированных контролируемых испытаниях, включая семь работ, среди которых и исследования R. Alrajeb, были проанализированы эффекты применения РЭКС в сравнении с традиционными методами. Эти исследования охватывали 1942 колена, из которых 974 были имплантированы с помощью РС ROBODOC и NAVIO. Результаты продемонстрировали, что РЭКС обеспечивает более качественное восстановление анатомического и механического выравнивания, чем традиционные методы замены. Несмотря на это, было установлено отсутствие значительных различий в клинических и функциональных исходах, а также в частоте осложнений. Основной вывод исследования заключается в том, что РС способны улучшить точность установки имплантатов и восстановление оси [23].

В рамках исследования авторами был проведен анализ 12 рандомизированных контролируемых испытаний, в которых приняли участие 2200 пациентов для сравнения РЭКС с традиционным методом. Были рассмотрены такие РС, как ROBODOC, NAVIO и МАКО, а также не-

сколько отечественных роботизированных устройств. NAVIO и МАКО показали себя как эффективные системы, каждая из которых имеет свои особенности и подходы к достижению целей механического выравнивания. Исследования показали, что в целом роботизированное эндопротезирование обеспечивает более высокую рентгенологическую точность по сравнению с традиционным методом. Однако среди РС не было выявлено значительных различий в клинических и функциональных исходах, таких как индекс WOMAC и амплитуда движений. ROBODOC и другие системы продемонстрировали снижение отклонения механического выравнивания. Однако это улучшение может не иметь клинически значимого эффекта, что указывает на необходимость дополнительных исследований для подтверждения потенциальных преимуществ этих систем [18, 37].

С учетом представленных данных, невозможно однозначно выбрать лучшую РС для ЭКС, поскольку каждая из них имеет свои преимущества и ограничения. Однако можно отметить, что РС, такие как Cuvis Joint, МАКО, NAVIO и другие, демонстрируют более высокую точность в установке имплантатов и восстановлении механического выравнивания по сравнению с традиционными методами. Это приводит к уменьшению интраоперационной кровопотери и повышает безопасность пациентов, что является важными преимуществами роботизированного подхода.

Таким образом, РС предоставляют значительные технологические преимущества и улучшения в некоторых аспектах, но требуют дальнейших исследований для точной оценки долгосрочных клинических выгод и понимания места каждого устройства в клинической практике [15].

Реабилитация после РЭКС

Переходя к обсуждению реабилитации после РЭКС, стоит обратить внимание на исследование В. Кауани, и др. Авторы провели проспективное когортное исследование для сравнения ранних функциональных результатов после 40 традиционных ТЭКС и 40 РЭКС. Исследователи об-

наружили, что РЭКС было связано с уменьшением послеоперационной боли, лучшим максимальным сгибанием колена на ранних сроках после операции [38].

Многоцентровое исследование без рандомизации провели А. Khloras, и др., в котором сравнили 102 стандартных ТЭКС с 150 РЭКС. Они выяснили, что РЭКС были связаны с более значительными улучшениями в ходьбе и способности стоять через 4–6 недель и спустя 3 мес. после операции по сравнению с традиционным методом ТЭКС [18].

Данные в литературе об эффективности РС при ЭКС выглядят достаточно противоречивыми, причем главные критические замечания касаются среднесрочных функциональных результатов [8, 33].

Согласно проведенному обзору, как традиционная методика выполнения тотальной артропластики коленного сустава, так и использование РС демонстрируют высокую надёжность и безопасность выполнения операции. Однако роботизированная операция позволяет достичь лучших результатов в плане выравнивания по различным осям и сопровождается меньшей кровопотерей, хотя статистически значимых различий в клинических исходах, объеме движений и частоте послеоперационных осложнений не наблюдается [32, 39].

Перспектива исследований

На данный момент существуют лишь ограниченные данные о РЭКС, но с ростом популярности РТ по всему миру ожидается, что дальнейшие исследования предоставят более убедительные доказательства.

Следует отметить, что РТ могут способствовать улучшению качества жизни пациентов. Благодаря прогрессу в РТ и программном обеспечении, а также их потенциальным положительным эффектам, в будущем РТ могут найти более широкое применение, включая эндопротезирование плечевого сустава, остеотомию большеберцовой кости, комплексные ревизии тотальной артропластики тазобедренного и коленного суставов, а также реконструкцию мегапротезов после резекции саркомы конечностей [32].

Заключение

Современные исследования подтверждают значительный прогресс в области роботизированного эндопротезирования коленного сустава, которое представляет собой инновационный подход для улучшения точности и безопасности хирургических вмешательств. Несмотря на очевидные преимущества, такие как высокая точность установки имплантатов и уменьшение интраоперационной кровопотери, долгосрочные результаты и клинические выгоды все еще требуют тщательной оценки.

Анализ существующей литературы и проведенных исследований показывает, что роботизированные системы, такие как

МАКО, Cuvis Joint и другие, демонстрируют улучшение в некоторых аспектах, включая точность хирургическую точность и восстановление выравнивания оси конечности. Однако, разница в клинических и функциональных результатах по сравнению с традиционными методами пока не является статистически значимой в долгосрочной перспективе.

Таким образом, развитие роботизированных технологий имеет перспективу улучшить качество жизни пациентов и повысить эффективность медицинской помощи, но требует дальнейшего исследования для полного понимания их клинической ценности и определения их места в хирургической практике.

Список источников

1. Лычагин А.В., Грицюк А.А., Рукин Я.А., и др. Клиническая эффективность и точность выравнивания механической оси при роботизированном тотальном эндопротезировании коленного сустава // *Гений ортопедии*. 2023. Т. 29, № 5. С. 487–494. doi: 10.18019/1028-4427-2023-29-5-487-494
2. Kienzle T.C. 3rd, Stulberg S.D., Peshkin M., et al. A Computer-Assisted Total Knee Replacement Surgical System Using a Calibrated Robot // *IEEE Engineering in Medicine and Biology*. 1995. Vol. 14, No. 3. P. 301–306.
3. Van Ham G., Denis K., Vander Sloten J., et al. Machining and Accuracy Studies for a Tibial Knee Implant Using a Force-Controlled Robot // *Comput. Aided Surg.* 1998. Vol. 3, No. 3. P. 123–133. doi: 10.3109/10929089809149840
4. Martelli M., Marcacci M., Nofrini L., et al. Computer- and Robot-Assisted Total Knee Replacement: Analysis of a New Surgical Procedure // *Ann. Biomed. Eng.* 2000. Vol. 28. P. 1146–1153. doi: 10.1114/1.1313774
5. Glozman D., Shoham M., Fischer A. A Surface-Matching Technique for Robot-Assisted Registration // *Comput. Aided Surg.* 2001. Vol. 6, No. 5. P. 259–269. doi: 10.3109/10929080109146091
6. Герасенкова А.Д., Орлецкий А.К., Шумский А.А., и др. Ранние результаты первичного робот-ассистированного эндопротезирования коленного сустава с использованием системы STRYKER MAKO // *Современные проблемы науки и образования*. 2024. № 2. С. 13. Доступно по: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=33312>. Ссылка активна на 30.11.2024. doi: 10.17513/spno.33312
7. Chandrashekar P., Babu K.A., Nagaraja H.S., et al. Intra-operative Safety of an Autonomous Robotic System for Total Knee Replacement: A Review of 500 Cases in India // *Indian J. Orthop.* 2023. Vol. 57, No. 11. P. 1800–1808. doi: 10.1007/s43465-023-00970-y
8. Vermue H., Batailler C., Monk P., et al. The evolution of robotic systems for total knee arthroplasty, each system must be assessed for its own value: a systematic review of clinical evidence and meta-analysis // *Arch. Orthop. Trauma Surg.* 2023. Vol. 143, No. 6. P. 3369–3381. doi: 10.1007/s00402-022-04632-w
9. Netravali N.A., Shen F., Park Y., et al. A Perspective on Robotic Assistance for Knee Arthroplasty // *Adv. Orthop.* 2013. Vol. 2013. P. 970703. doi: 10.1155/2013/970703
10. Matsen F.A. 3rd, Garbini J.L., Sidles J.A., et al. Robotic assistance in orthopaedic surgery: a proof of principle using distal femoral arthroplasty // *Clin. Orthop. Relat. Res.* 1993. No. 296. P. 178–186.
11. Fadda M., Marcacci M., Toksvig-Larsen S., et al. Improving accuracy of bone resections using robotics tool holder and a high speed milling cutting tool // *J. Med. Eng. Technol.* 1998. Vol. 22, No. 6. P. 280–284. doi: 10.3109/03091909809010012
12. Norton J., Sambandam S., Mounasamy V., et al. Robotic arm-assisted versus conventional total knee arthroplasty: comparing complications, costs, and postoperative opioid use in propensity-matched cohorts // *Eur. J. Orthop. Surg. Traumatol.* 2024. Vol. 34, No. 8. P. 3917–3929. doi: 10.1007/s00590-024-04077-4
13. Wolf A., Jaramaz B., Lisien B., et al. MBARS: mini bone-attached robotic system for joint arthroplasty // *Int. J. Med. Robot.* 2005. Vol. 1, No. 2. P. 101–121. doi: 10.1002/rcs.20
14. Song S., Mor A., Jaramaz B. HyBAR: hybrid bone-attached robot for joint arthroplasty // *Int. J.*

- Med. Robot. 2009. Vol. 5, No. 2. P. 223–231. doi: 10.1002/rcs.254
15. Kayani B., Konan S., Tahmassebi J., 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 // *Bone Joint J.* 2018. Vol. 100-B, No. 7. P. 930–937. doi: 10.1302/0301-620x.100b7.bjj-2017-1449.r1
 16. Savov P., Tuecking L.-R., Windhagen H., et al. Imageless robotic handpiece-assisted total knee arthroplasty: a learning curve analysis of surgical time and alignment accuracy // *Arch. Orthop. Trauma Surg.* 2021. Vol. 141, No. 12. P. 2119–2128. doi: 10.1007/s00402-021-04036-2
 17. Held M.B., Grosse M.J., Gazgalis A., et al. Improved Compartment Balancing Using a Robot-Assisted Total Knee Arthroplasty // *Arthroplast. Today.* 2021. Vol. 7. P. 130–134. doi: 10.1016/j.artd.2020.12.022
 18. Khlopas A., Sodhi N., Hozack W.J., et al. Patient-Reported Functional and Satisfaction Outcomes after Robotic-Arm-Assisted Total Knee Arthroplasty: Early Results of a Prospective Multicenter Investigation // *J. Knee Surg.* 2020. Vol. 33, No. 7. P. 685–690. doi: 10.1055/s-0039-1684014
 19. Vanlommel L., Neven E., Anderson M.B., et al. The initial learning curve for the ROSA[®] knee system can be achieved in 6–11 cases for operative time and has similar 90-day complication rates with improved implant alignment compared to manual instrumentation in total knee arthroplasty // *J. Exp. Orthop.* 2021. Vol. 8, No. 1. P. 119. doi: 10.1186/s40634-021-00438-8
 20. Blum C.L., Lepkowsky E., Hussein A., et al. Patient expectations and satisfaction in robotic-assisted total knee arthroplasty: a prospective two-year outcome study // *Arch. Orthop. Trauma Surg.* 2021. Vol. 141, No. 12. P. 2155–2164. doi: 10.1007/s00402-021-04067-9
 21. Keggi J.M., Wakelin E.A., Koenig J.A., et al. Impact of intra-operative predictive ligament balance on postoperative balance and patient outcome in TKA: a prospective multicenter study // *Arch. Orthop. Trauma Surg.* 2021. Vol. 141, No. 12. P. 2165–2174. doi: 10.1007/s00402-021-04043-3
 22. Marchand R.C., Sodhi N., Anis H.K., et al. One-Year Patient Outcomes for Robotic-Arm-Assisted Versus Manual Total Knee Arthroplasty // *J. Knee Surg.* 2019. Vol. 32, No. 11. P. 1063–1068. doi: 10.1055/s-0039-1683977
 23. 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. Vol. 34, No. 3. P. 1333–1343. doi: 10.1007/s00590-023-03798-2
 24. Chang J.S., Kayani B., Wallace C., et al. Functional alignment achieves soft-tissue balance in total knee arthroplasty as measured with quantitative sensor-guided technology // *Bone Joint J.* 2021. Vol. 103-B, No. 3. P. 507–514. doi: 10.1302/0301-620x.103b.bjj-2020-0940.r1
 25. Lee G.-C., Wakelin E., Randall A., et al. Can a robot help a surgeon to predict a good total knee arthroplasty? // *Bone Joint J.* 2021. Vol. 103-B, No. 6, Suppl. A. P. 67–73. doi: 10.1302/0301-620x.103b6.bjj-2020-2305.r1
 26. Kayani B., Konan S., Huq S.S., et al. Robotic-arm assisted total knee arthroplasty has a learning curve of seven cases for integration into the surgical workflow but no learning curve effect for accuracy of implant positioning // *Knee Surg. Sports Traumatol. Arthrosc.* 2019. Vol. 27, No. 4. P. 1132–1141. doi: 10.1007/s00167-018-5138-5
 27. Smith A.F., Eccles C.J., Bhimani S.J., et al. Improved Patient Satisfaction Following Robotic-Assisted Total Knee Arthroplasty // *J. Knee Surg.* 2021. Vol. 34, No. 7. P. 730–738. doi: 10.1055/s-0039-1700837
 28. Naziri Q., Cusson B.C., Chaudhri M., et al. Making the transition from traditional to robotic-arm assisted TKA: What to expect? A single-surgeon comparative-analysis of the first-40 consecutive cases // *J Orthop.* 2019. Vol. 16, No. 4. P. 364–368. doi: 10.1016/j.jor.2019.03.010
 29. Young S.W., Zeng N., Tay M.L., et al. A prospective randomised controlled trial of mechanical axis with soft tissue releases balancing vs functional alignment with bony resection balancing in total knee replacement — a study using Stryker Mako robotic arm-assisted technology // *Trials.* 2022. Vol. 23, No. 1. P. 580. doi: 10.1186/s13063-022-06494-4
 30. Mitchell J., Wang J., Bukowski B., et al. Relative Clinical Outcomes Comparing Manual and Robotic-Assisted Total Knee Arthroplasty at Minimum 1-Year Follow-up // *HSS J.* 2021. Vol. 17, No. 3. P. 267–273. doi: 10.1177/15563316211028568
 31. Banerjee S., Cherian J.J., Elmallah R.K., et al. Robotic-assisted knee arthroplasty // *Expert Rev. Med. Devices.* 2015. Vol. 12, No. 6. P. 727–735. doi: 10.1586/17434440.2015.1086264
 32. Burgio C., Bosco F., Rovere G., et al. Early and delayed periprosthetic joint infection in robot-assisted total knee arthroplasty: a multicenter study // *Eur. J. Orthop. Surg. Traumatol.* 2024. Vol. 34, No. 6. P. 3155–3162. doi: 10.1007/s00590-024-04043-0
 33. Bell C., Grau L., Orozco F., et al. The successful implementation of the Navio robotic technology required 29 cases // *J. Robot. Surg.* 2022. Vol. 16, No. 3. P. 495–499. doi: 10.1007/s11701-021-01254-z
 34. Fu X., She Y., Jin G., et al. Comparison of robotic-assisted total knee arthroplasty: an updated systematic review and meta-analysis // *J. Robot. Surg.* 2024. Vol. 18, No. 1. P. 292. doi: 10.1007/s11701-024-02045-y
 35. Zhang J., Ndou W.S., Ng N., et al. Correction to: 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. 2022. Vol. 30, No. 8. P. 2696–2697. doi: 10.1007/s00167-021-06522-x

36. Ren Y., Cao S., Wu J., 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. Vol. 95, No. 1121. P. 125–133. doi: 10.1136/postgradmedj-2018-136190

37. Ruangsomboon P., Ruangsomboon O., Pornratanamaneewong C., et al. Clinical and radiological outcomes of robotic-assisted versus conventional total knee arthroplasty: a systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials // *Acta*

Orthop. 2023. Vol. 94. P. 60–79. doi: 10.2340/17453674.2023.9411

38. Kayani B., Konan S., Ayuob A., et al. Robotic technology in total knee arthroplasty: a systematic review // *EFORT Open Rev.* 2019. Vol. 4, No. 10. P. 611–617. doi: 10.1302/2058-5241.4.190022

39. Giustra F., Bistolf A., Bosco F., et al. Highly cross-linked polyethylene versus conventional polyethylene in primary total knee arthroplasty: comparable clinical and radiological results at a 10-year follow-up // *Knee Surg. Sports Traumatol. Arthrosc.* 2023. Vol. 31, No. 3. P. 1082–1088. doi: 10.1007/s00167-022-07226-6

References

1. Lychagin AV, Gritsyuk AA, Rukin YaA, et al. Clinical evaluation and accuracy of mechanical axis alignment in robotic total knee arthroplasty. *Genij Ortopedii.* 2023;29(5):487–94. (In Russ). doi: 10.18019/1028-4427-2023-29-5-487-494

2. Kienzle TC 3rd, Stulberg SD, Peshkin M, et al. A Computer-Assisted Total Knee Replacement Surgical System Using a Calibrated Robot. *IEEE Engineering in Medicine and Biology.* 1995; 14(3):301–6.

3. Van Ham G, Denis K, Vander Sloten J, et al. Machining and Accuracy Studies for a Tibial Knee Implant Using a Force-Controlled Robot. *Comput Aided Surg.* 1998;3(3):123–33. doi: 10.3109/10929089809149840

4. Martelli M, Marcacci M, Nofrini L, et al. Computer- and Robot-Assisted Total Knee Replacement: Analysis of a New Surgical Procedure. *Ann Biomed Eng.* 2000;28:1146–53. doi: 10.1114/1.1313774

5. Glozman D, Shoham M, Fischer A. A Surface-Matching Technique for Robot-Assisted Registration. *Comput Aided Surg.* 2001;6(5):259–69. doi: 10.3109/10929080109146091

6. Gerasenkova AD, Orletskiy AK, Shumskiy AA, et al. Early results of primary robot-assisted knee endoprosthetics using the STRYKER MAKO system. *Modern Problems of Science and Education.* 2024; (2):13. Available at: <https://science-education.ru/article/view?id=33312>. Accessed: 2024 November 30. (In Russ). doi: 10.17513/spno.33312

7. Chandrashekar P, Babu KA, Nagaraja HS, et al. Intra-operative safety of an autonomous robotic system for total knee replacement: a review of 500 cases in India. *Indian J Orthop.* 2023;57(11): 1800–8. doi: 10.1007/s43465-023-00970-y

8. Vermue H, Batailler C, Monk P, et al. The evolution of robotic systems for total knee arthroplasty, each system must be assessed for its own value: a systematic review of clinical evidence and meta-analysis. *Arch Orthop Trauma Surg.* 2023;143(6): 3369–81. doi: 10.1007/s00402-022-04632-w

9. Netravali NA, Shen F, Park Y, et al. A Perspective on Robotic Assistance for Knee Arthroplasty. *Adv Orthop.* 2013;2013:970703. doi: 10.1155/2013/970703

10. Matsen FA 3rd, Garbini JL, Sidles JA, et al. Robotic assistance in orthopaedic surgery: a proof of principle using distal femoral arthroplasty. *Clin Orthop Relat Res.* 1993;(296):178–86.

11. Fadda M, Marcacci M, Toksvig–Larsen S, et al. Improving accuracy of bone resections using robotics tool holder and a high speed milling cutting tool. *J Med Eng Technol.* 1998;22(6):280–4. doi: 10.3109/03091909809010012

12. Norton J, Sambandam S, Mounasamy V, et al. Robotic arm-assisted versus conventional total knee arthroplasty: comparing complications, costs, and postoperative opioid use in propensity-matched cohorts. *Eur J Orthop Surg Traumatol.* 2024;34(8): 3917–29. doi: 10.1007/s00590-024-04077-4

13. Wolf A., Jaramaz B., Lisien B., et al. MBARS: mini bone-attached robotic system for joint arthroplasty. *Int J Med Robot.* 2005;1(2):101–21. doi: 10.1002/rcs.20

14. Song S, Mor A, Jaramaz B. HyBAR: hybrid bone-attached robot for joint arthroplasty. *Int J Med Robot.* 2009;5(2):223–31. doi: 10.1002/rcs.254

15. Kayani B, Konan S, Tahmassebi J, 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. *Bone Joint J.* 2018;100-B(7):930–7. doi: 10.1302/0301-620x.100b7.bjj-2017-1449.r1

16. Savov P, Tuecking L–R, Windhagen H, et al. Imageless robotic handpiece-assisted total knee arthroplasty: a learning curve analysis of surgical time and alignment accuracy. *Arch Orthop Trauma Surg.* 2021;141(12):2119–28. doi: 10.1007/s00402-021-04036-2

17. Held MB, Grosso MJ, Gazgalis A, et al. Improved Compartment Balancing Using a Robot-Assisted Total Knee Arthroplasty. *Arthroplast Today.* 2021;7:130–4. doi: 10.1016/j.artd.2020.12.022

18. Khlopas A, Sodhi N, Hozack WJ, et al. Patient-Reported Functional and Satisfaction Outcomes after Robotic-Arm-Assisted Total Knee Arthroplasty: Early Results of a Prospective Multicenter

- Investigation. *J Knee Surg.* 2020;33(7):685–90. doi: 10.1055/s-0039-1684014
19. Vanlommel L, Neven E, Anderson MB, et al. The initial learning curve for the ROSA[®] knee system can be achieved in 6–11 cases for operative time and has similar 90-day complication rates with improved implant alignment compared to manual instrumentation in total knee arthroplasty. *J Exp Orthop.* 2021;8(1):119. doi: 10.1186/s40634-021-00438-8
 20. Blum CL, Lepkowsky E, Hussein A, et al. Patient expectations and satisfaction in robotic-assisted total knee arthroplasty: a prospective two-year outcome study. *Arch Orthop Trauma Surg.* 2021; 141(12):2155–64. doi: 10.1007/s00402-021-04067-9
 21. Keggi JM, Wakelin EA, Koenig JA, et al. Impact of intra-operative predictive ligament balance on postoperative balance and patient outcome in TKA: a prospective multicenter study. *Arch Orthop Trauma Surg.* 2021;141(12):2165–74. doi: 10.1007/s00402-021-04043-3
 22. Marchand RC, Sodhi N, Anis HK, et al. One-Year Patient Outcomes for Robotic-Arm-Assisted Versus Manual Total Knee Arthroplasty. *J Knee Surg.* 2019;32(11):1063–8. doi: 10.1055/s-0039-1683977
 23. 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):1333–43. doi: 10.1007/s00590-023-03798-2
 24. Chang JS, Kayani B, Wallace C, et al. Functional alignment achieves soft-tissue balance in total knee arthroplasty as measured with quantitative sensor-guided technology. *Bone Joint J.* 2021;103-B(3):507–14. doi: 10.1302/0301-620x.103b.bjj-2020-0940.r1
 25. Lee G–C, Wakelin E, Randall A, et al. Can a robot help a surgeon to predict a good total knee arthroplasty? *Bone Joint J.* 2021;103-B(6 Suppl A):67–73. doi: 10.1302/0301-620x.103b6.bjj-2020-2305.r1
 26. Kayani B, Konan S, Huq SS, et al. Robotic-arm assisted total knee arthroplasty has a learning curve of seven cases for integration into the surgical workflow but no learning curve effect for accuracy of implant positioning. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* 2019;27(4):1132–41. doi: 10.1007/s00167-018-5138-5
 27. Smith AF, Eccles CJ, Bhimani SJ, et al. Improved patient satisfaction following robotic-assisted total knee arthroplasty. *J Knee Surg.* 2021;34(7):730–8. doi: 10.1055/s-0039-1700837
 28. Naziri Q, Cusson BC, Chaudhri M, et al. Making the transition from traditional to robotic-arm assisted TKA: What to expect? A single-surgeon comparative-analysis of the first-40 consecutive cases. *J Orthop.* 2019;16(4):364–8. doi: 10.1016/j.jor.2019.03.010
 29. Young SW, Zeng N, Tay ML, et al. A prospective randomised controlled trial of mechanical axis with soft tissue release balancing vs functional alignment with bony resection balancing in total knee replacement — a study using Stryker Mako robotic arm-assisted technology. *Trials.* 2022; 23(1):580. doi: 10.1186/s13063-022-06494-4
 30. Mitchell J, Wang J, Bukowski B, et al. Relative Clinical Outcomes Comparing Manual and Robotic-Assisted Total Knee Arthroplasty at Minimum 1-Year Follow-up. *HSS J.* 2021;17(3):267–73. doi: 10.1177/15563316211028568
 31. Banerjee S, Cherian JJ, Elmallah RK, et al. Robotic-assisted knee arthroplasty. *Expert Rev Med Devices.* 2015;12(6):727–35. doi: 10.1586/1743444.2015.1086264
 32. Burgio C, Bosco F, Rovere G, et al. Early and delayed periprosthetic joint infection in robot-assisted total knee arthroplasty: a multicenter study. *Eur J Orthop Surg Traumatol.* 2024;34(6): 3155–62. doi: 10.1007/s00590-024-04043-0
 33. Bell C, Grau L, Orozco F, et al. The successful implementation of the Navio robotic technology required 29 cases. *J Robot Surg.* 2022;16(3):495–9. doi: 10.1007/s11701-021-01254-z
 34. Fu X, She Y, Jin G, et al. Comparison of robotic-assisted total knee arthroplasty: an updated systematic review and meta-analysis. *J Robot Surg.* 2024;18(1):292. doi: 10.1007/s11701-024-02045-y
 35. Zhang J, Ndou WS, Ng N, et al. Correction to: 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.* 2022;30(8):2696–7. doi: 10.1007/s00167-021-06522-x
 36. Ren Y, Cao S, Wu J, 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):125–33. doi: 10.1136/postgradmedj-2018-136190
 37. Ruangsomboon P, Ruangsomboon O, Pornratnamaneewong C, et al. Clinical and radiological outcomes of robotic-assisted versus conventional total knee arthroplasty: a systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials. *Acta Orthop.* 2023;94:60–79. doi: 10.2340/17453674.2023.9411
 38. Kayani B, Konan S, Ayuob A, et al. Robotic technology in total knee arthroplasty: a systematic review. *EFORT Open Rev.* 2019;4(10):611–7. doi: 10.1302/2058-5241.4.190022
 39. Giustra F, Bistolf A, Bosco F, et al. Highly cross-linked polyethylene versus conventional polyethylene in primary total knee arthroplasty: comparable clinical and radiological results at a 10-year follow-up. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* 2023;31(3):1082–8. doi: 10.1007/s00167-022-07226-6

Дополнительная информация

Финансирование. Авторы заявляют об отсутствии финансирования при проведении исследования.

Информация об авторах:

✉ *Гайрабеков Исраил Магомед-Хаджиевич* — врач травматолог-ортопед, аспирант, <https://orcid.org/0009-0006-6298-7084>, e-mail: israil951998@gmail.com

Каграманов Сергей Владимирович — врач травматолог-ортопед, научный сотрудник, аспирант, SPIN: 4670-7747, <https://orcid.org/0000-0002-8434-1915>, e-mail: Kagramanov2001@mail.ru

Алексанян Оваким Аргамович — врач травматолог-ортопед, аспирант, SPIN: 9780-3598, <https://orcid.org/0000-0002-6909-6624>, e-mail: hovakim1992@mail.ru

Загородний Николай Васильевич — д-р мед. наук, профессор, Член-корреспондент РАН, советник директора, заведующий отделением эндопротезирования № 2; заведующий кафедрой травматологии и ортопедии Медицинского института, SPIN: 6889-8166, <https://orcid.org/0000-0002-6736-9772>, e-mail: zagorodniy51@mail.ru

Хажкасимов Мухамед Ризуанович — врач травматолог-ортопед, аспирант, <https://orcid.org/0009-0002-6262-7549>, e-mail: Muhamed040101@mail.ru

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Funding. The authors declare no funding for the study.

Information about the authors:

✉ *Israil M.-Kh. Gayrabekov* — MD, Orthopedic Traumatologist, Graduate Student, <https://orcid.org/0009-0006-6298-7084>, e-mail: israil951998@gmail.com

Sergey V. Kagramanov — MD, Orthopedic Traumatologist, Research Associate, Graduate Student, SPIN: 4670-7747, <https://orcid.org/0000-0002-8434-1915>, e-mail: Kagramanov2001@mail.ru

Hovakim A. Aleksanyan — MD, Orthopedic Traumatologist, Graduate Student, SPIN: 9780-3598, <https://orcid.org/0000-0002-6909-6624>, e-mail: hovakim1992@mail.ru

Nikolay V. Zagorodniy — MD, Dr. Sci. (Med.), Professor, Advisor to the Director, Head of the Department of Endoprosthetics No. 2; Head of the Department of Traumatology and Orthopedics of the Medical Institute, SPIN: 6889-8166, <https://orcid.org/0000-0002-6736-9772>, e-mail: zagorodniy51@mail.ru

Mukhamed R. Khazhkasimov — MD, Orthopedic Traumatologist, Graduate Student, <https://orcid.org/0009-0002-6262-7549>, e-mail: Muhamed040101@mail.ru

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.