

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИНТЕРАКТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В ВОССТАНОВИТЕЛЬНОМ ЛЕЧЕНИИ ПОСЛЕ РЕВИЗИОННОЙ АРТРОПЛАСТИКИ КОЛЕННОГО СУСТАВА

Б. Ш. Минасов¹, Р. Р. Якупов¹, В. Н. Акбашев¹✉, А. Р. Билялов¹, И. О. Евграфов¹, К. К. Каримов², И. Б. Минасов¹, А. А. Ахмельдинова¹, М. Р. Салимьянова¹

¹ Башкирский государственный медицинский университет, Республика Башкортостан, Уфа, Россия

² Таджикский государственный медицинский университет имени Абуали ибни Сино, Душанбе, Таджикистан

Хроническая перипротезная инфекция после эндопротезирования коленного сустава требует двухэтапного лечения, однако межэтапная реабилитация пациентов с артикулирующим спейсером разработана недостаточно. Целью работы было определить, повышает ли включение интерактивной тренировки ходьбы с биологической обратной связью на комплексе Walker View эффективность стандартной восстановительной программы после первого этапа двухэтапной ревизионной операции. В проспективное рандомизированное контролируемое исследование включили 87 пациентов после удаления эндопротеза и установки артикулирующего спейсера. Основная группа ($n = 43$) проходила стандартную реабилитацию в сочетании с тренировкой на Walker View, контрольная ($n = 44$) — только стандартную программу; курс составил 21 день. Оценивали объем движений в коленном суставе, амплитуду ЭМГ четырехглавой мышцы, длину шага, скорость ходьбы, постральную устойчивость, показатели SF-36, WOMAC и KSS. К окончанию курса в основной группе достигнуты лучшие результаты: сгибание $78 \pm 6^\circ$ против $71 \pm 7^\circ$ ($p = 0,01$), амплитуда ЭМГ 179 ± 16 против 165 ± 16 мкВ ($p = 0,01$), длина шага $54,2 \pm 5,0$ против $49,5 \pm 5,0$ см ($p = 0,01$), скорость ходьбы $0,70 \pm 0,05$ против $0,65 \pm 0,05$ м/с ($p = 0,02$), общая стабильность $80 \pm 8\%$ против $72 \pm 7\%$ ($p = 0,01$), физический компонент SF-36 — 51 ± 8 против 47 ± 7 баллов ($p = 0,01$). Различия по WOMAC и KSS были статистически незначимы ($p = 0,06$ и $p = 0,07$). Включение Walker View в межэтапную реабилитацию обеспечивает более выраженное восстановление подвижности, нейромышечной функции, ходьбы и равновесия.

Ключевые слова: ревизионная артропластика, коленный сустав, перипротезная инфекция, реабилитация, биологическая обратная связь, Walker View, двухэтапное ревизионное эндопротезирование, артикулирующий спейсер

Вклад авторов: Б. Ш. Минасов — концепция и дизайн исследования, научное руководство, редактирование; Р. Р. Якупов — дизайн исследования, анализ данных, подготовка текста; В. Н. Акбашев — концепция исследования, интерпретация результатов, редактирование; А. Р. Билялов — сбор клинического материала, обследование пациентов, подготовка материалов для анализа; И. О. Евграфов — реабилитационные мероприятия, сбор и систематизация клинических данных; К. К. Каримов — методическое обеспечение исследования, техническое сопровождение, анализ полученных данных; И. Б. Минасов — интерпретация результатов, подготовка и редактирование текста; А. А. Ахмельдинова — статистическая обработка данных, оформление результатов исследования; М. Р. Салимьянова — анализ литературы, подготовка и оформление рукописи.

Соблюдение этических стандартов: исследование одобрено этическим комитетом ФГБОУ ВО «Башкирский государственный медицинский университет» Минздрава России (протокол № 2 от 03 февраля 2025 г.). Все процедуры проведены в соответствии с требованиями Хельсинкской декларации Всемирной медицинской ассоциации (2013 г.). Все пациенты подписали добровольное информированное согласие на участие.

✉ **Для корреспонденции:** Владислав Николаевич Акбашев
ул. Ленина, д. 3, г. Уфа, 450008, Россия; vlad-akb@mail.ru

Статья получена: 21.03.2026 **Статья принята к печати:** 10.04.2026 **Опубликована онлайн:** 27.04.2026

DOI: 10.24075/vrgmu.2026.018

Авторские права: © 2026 принадлежат авторам. **Лицензиат:** РНИМУ им. Н. И. Пирогова. Статья размещена в открытом доступе и распространяется на условиях лицензии Creative Commons Attribution (CC BY) (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

USING INTERACTIVE TECHNOLOGIES FOR REHABILITATION FOLLOWING REVISION KNEE ARTHROPLASTY

Minasov BSh¹, Yakupov RR¹, Akbashev VN¹✉, Bilyalov AR¹, Evgrafov IO¹, Karimov KK², Minasov IB¹, Akhmeldinova AA¹, Salimyanova MR¹

¹ Bashkir State Medical University, Republic of Bashkortostan, Ufa, Russia

² Avicenna Tajik State Medical University, Dushanbe, Tajikistan

A chronic periprosthetic infection after knee replacement typically requires two-stage treatment. However, the inter-stage rehabilitation protocol for patients with an articulating spacer has not been adequately developed. This study aimed to determine whether adding interactive biofeedback walking training on the Walker View treadmill enhances the effectiveness of a standard recovery program following the first stage of two-stage revision treatment. The prospective randomized controlled trial included 87 patients who had undergone removal of their endoprostheses and placement of articulating spacers. The treatment group ($n = 43$) had the standard 21-day rehabilitation program combined with Walker View sessions, while the control group ($n = 44$) only followed the program. We assessed knee joint movement volume, quadriceps EMG amplitude, stride length, walking speed, postural stability, and SF-36, WOMAC, and KSS scores. By the end of the rehabilitation course, the results registered in the treatment group were better than in the control group: flexion — $78 \pm 6^\circ$ versus $71 \pm 7^\circ$ ($p = 0,01$); EMG amplitude — 179 ± 16 versus 165 ± 16 μ V ($p = 0,01$); step length — $54,2 \pm 5,0$ versus $49,5 \pm 5,0$ cm ($p = 0,01$); walking speed — $0,70 \pm 0,05$ versus $0,65 \pm 0,05$ m/s ($p = 0,02$); overall stability — $80 \pm 8\%$ versus $72 \pm 7\%$ ($p = 0,01$); physical component SF-36 — 51 ± 8 versus 47 ± 7 points ($p = 0,01$). The differences in WOMAC and KSS scores were insignificant ($p = 0,06$ and $p = 0,07$). The inclusion of Walker View sessions in the inter-stage rehabilitation program yields more pronounced improvements in mobility, neuromuscular function, walking, and balance restoration.

Keywords: revision arthroplasty, knee joint, periprosthetic infection, rehabilitation, biofeedback, Walker View, two-stage revision arthroplasty, articulating spacer

Author contribution: Minasov BS — study concept and design, research supervision, editing; Yakupov RR — study design, data analysis, text preparation; Akbashev VN — study concept, interpretation of results, editing; Bilyalov AR — collection of clinical material, examination of patients, preparation of materials for analysis; Yevgrafov IO — rehabilitation program, collection and systematization of clinical data; Karimov KK — methodological support of the study, technical support, analysis of the obtained data; Minasov IB — interpretation of the results, text preparation and editing; Akhmeldinova AA — statistical data processing, registration of the results of the study; Salimyanova MR — literature analysis, preparation and registration of the manuscript.

Compliance with ethical standards: the study was approved by the Ethics Committee of the Bashkir State Medical University of the Ministry of Health of the Russian Federation (Minutes #2 of February 03, 2025). All procedures were performed in accordance with the requirements of the 2013 World Medical Association Declaration of Helsinki. All patients signed a voluntary informed consent form for participation in the study.

✉ **Correspondence should be addressed:** Vladislav N. Akbashev
Lenina, 3, Ufa, 450008, Russia; vlad-akb@mail.ru

Received: 21.03.2026 **Accepted:** 10.04.2026 **Published online:** 27.04.2026

DOI: 10.24075/brsmu.2026.018

Copyright: © 2026 by the authors. **Licensee:** Pirogov University. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Рост распространенности деструктивно-дистрофических заболеваний опорно-двигательного аппарата обусловил широкое внедрение эндопротезирования крупных суставов. По данным федерального статистического наблюдения, первичная заболеваемость остеоартрозом в Российской Федерации увеличилась с 546,9 до 650,0 случаев на 100 000 населения в период с 2015 по 2024 г. (рост на 18%) [1]. Эндопротезирование коленного сустава — наиболее эффективный метод хирургического лечения деструктивно-дистрофических поражений. Он признан золотым стандартом современной ортопедии и позволяет существенно повысить качество и продолжительность жизни пациентов. Однако диапазон функциональных свойств имплантационных систем имеет естественные ограничения, и со временем возникает проблема износа компонентов эндопротеза. По прогнозам, к 2030 г. в США будет ежегодно выполнено более 260 000 ревизионных операций на коленном суставе [2]. Многолетняя эксплуатация эндопротеза сопровождается изменением силовых векторов напряжения в костной и соединительной ткани, что приводит к формированию биомеханического конфликта между имплантатом и опорными структурами. В результате развиваются асептическая нестабильность, металлоз, остеолит, а при присоединении микробного фактора — перипротезная инфекция (ППИ).

ППИ представляет собой одно из наиболее тяжелых осложнений эндопротезирования коленного сустава. По данным крупных когортных исследований, частота ППИ составляет 1–2% после первичного эндопротезирования и возрастает до 4% после ревизионных операций [3]. ППИ является ведущей причиной ревизионного вмешательства, обгоняя по частоте асептическую нестабильность и износ полиэтилена [4]. Хроническая перипротезная инфекция коленного сустава сопровождается деструкцией мягких тканей и кости, снижением функции конечности и нередко требует выполнения двухэтапной ревизионной артропластики с установкой временного антибиотикосодержащего спейсера.

Наиболее признанным методом лечения хронической инфекции в таких случаях остается двухэтапная ревизионная артропластика. Первый этап операции направлен на санацию очага инфекции, стабилизацию мягкотканых и костных структур, а также — при использовании артикулирующего спейсера — на частичное сохранение функции конечности. Ключевым фактором эффективности двухэтапной методики выступает качество восстановительного периода между этапами, который обычно составляет от шести до 12 недель [5]. Существующие подходы к реабилитации в межэтапном периоде включают раннюю мобилизацию и лечебную физкультуру [6]. Применение артикулирующих спейсеров позволяет начинать активную реабилитацию уже в раннем послеоперационном периоде [7], однако оптимальные методы реабилитации в этих условиях остаются недостаточно изученными. Некоторые авторы рекомендуют щадящий режим для предотвращения дислокации спейсера, тогда как другие подчеркивают необходимость ранней активизации для профилактики мышечной атрофии [8].

В последние годы в реабилитацию опорно-двигательного аппарата активно внедряют технологии биологической обратной связи. Платформа Walker View (TespоBody, Италия) представляет собой беговую дорожку с интегрированной системой 3D-анализа движений и сенсорной поверхностью, позволяющей в реальном

времени оценивать временно-пространственные параметры походки, симметрию шага и кинематику суставов [9, 10]. Использование подобных технологий продемонстрировало эффективность при реабилитации после первичной артропластики коленного сустава [11], однако информация о применении данных систем в условиях временного спейсера при двухэтапной ревизионной артропластике отсутствует [12].

Таким образом, несмотря на имеющиеся данные об эффективности интерактивных технологий биологической обратной связи при реабилитации после первичной артропластики, их применение в условиях временного артикулирующего спейсера при двухэтапной ревизионной артропластике остается неизученным, что определяет актуальность настоящего исследования.

Цель исследования — оценить эффективность комплексной реабилитационной программы с включением интерактивной тренировки ходьбы с биологической обратной связью на системе Walker View по сравнению со стандартной программой у пациентов после первого этапа двухэтапной ревизионной артропластики коленного сустава при хронической ППИ.

ПАЦИЕНТЫ И МЕТОДЫ

Выполнено проспективное рандомизированное контролируемое исследование, направленное на оценку эффективности комплексной реабилитации после первого этапа двухэтапной ревизионной артропластики коленного сустава у пациентов с хронической перипротезной инфекцией. Дизайн исследования предусматривал сравнение стандартной программы восстановительного лечения и расширенной программы с использованием интерактивных технологий биологической обратной связи.

Критерии включения: возраст от 55 до 75 лет; установленный диагноз хронической перипротезной инфекции коленного сустава (код по МКБ-10: (Т84.5)); отсутствие значимых соматических заболеваний, ограничивающих возможность проведения реабилитации; информированное согласие пациента на участие в исследовании.

Критерии исключения: острые инфекционные заболевания на момент включения в исследование; тяжелые сопутствующие заболевания в стадии декомпенсации: а) сердечно-сосудистая недостаточность III–IV функционального класса по классификации Нью-Йоркской кардиологической ассоциации (NYHA); б) сахарный диабет с уровнем гликированного гемоглобина (HbA1c) свыше 8,5%; в) тяжелая хроническая обструктивная болезнь легких с показателем форсированной жизненной емкости легких первой секунды (FEV1) менее 50% от должного; г) терминальная стадия хронической болезни почек (скорость клубочковой фильтрации менее 15 мл/мин/1,73 м² или диализозависимость); отказ пациента от участия в исследовании; когнитивные нарушения, препятствующие выполнению реабилитационной программы (оценка по шкале минипсихического статус-экзамена [MMSE] менее 24 баллов).

Характеристика выборки

В исследование включено 87 пациентов, находившихся на стационарном лечении с диагнозом «хроническая перипротезная инфекция» и перенесших первый этап двухэтапной ревизионной артропластики коленного

сустава с установкой артикулирующего спейсера, изготовленного в лаборатории «Аддитивных технологий» ФГБОУ ВО БГМУ (№ Евразийской заявки 202492817).

Расчет объема выборки проведен с использованием программы G*Power 3.1.9.7. Исходя из ожидаемой разницы объема движений в коленном суставе 10° (среднее значение $70^\circ \pm 15^\circ$ в контрольной группе и $80^\circ \pm 15^\circ$ в исследуемой группе), мощности исследования 80% и уровня значимости $\alpha = 0,05$, потребовалось включить минимум 36 пациентов в каждую группу. С учетом ожидаемого выпадения 15% планировалось включить 44 пациента в каждую группу (общий объем выборки — 88 пациентов). Фактически включено 87 пациентов (один пациент выбыл из исследования до начала реабилитации по причине отказа от участия). Средний возраст выборки составил $65,4 \pm 5,2$ года. Распределение по полу: 51 женщина (58,6%) и 36 мужчин (41,4%). Рандомизацию проводили методом блочной рандомизации с размером блока 4 с использованием компьютерного генератора случайных чисел: исследуемая группа ($n = 43$); контрольная группа ($n = 44$).

Распределение пациентов по группам осуществляли после выполнения первого этапа хирургического вмешательства и получения информированного согласия. Ввиду характера реабилитационного вмешательства ослепление пациентов и специалистов, проводивших реабилитацию, не представлялось возможным. Оценку функциональных исходов и статистическую обработку данных выполняли специалисты, не участвовавшие в проведении реабилитационной программы и не информированные о групповой принадлежности пациентов. Группы были сопоставимы по возрасту и полу ($p > 0,05$).

Реабилитационная программа

Реабилитационная программа начиналась с первых суток после выполнения первого этапа ревизионной артропластики и продолжалась в течение 21 дня стационарного этапа восстановления. Весь период реабилитации был разделен на два последовательных этапа: ранний послеоперационный период (1–4 сутки) и основной этап восстановительного лечения (5–21 сутки).

Ранний послеоперационный период (1–4 сутки)

В раннем послеоперационном периоде применяли щадящие изометрические упражнения, направленные на профилактику тромбозов, поддержание мышечного тонуса и сохранение базовой двигательной активности.

Комплекс включал следующие элементы.

1. Изометрические упражнения для мышц бедра — статическое напряжение четырехглавой мышцы бедра и приводящих мышц с постепенным увеличением длительности напряжения от 5 до 10–15 с с последующим расслаблением в течение 10 с; 10 повторений, 3 подхода в день.

2. Активные движения в голеностопных суставах — сгибание и разгибание стопы, круговые движения; 15–20 повторений каждое упражнение, 4–5 раз в день для стимуляции венозного оттока.

3. Прямой подъем ноги в положении лежа — активное разгибание коленного сустава с последующим подъемом выпрямленной ноги на 15–20 см от поверхности койки, фиксация в течение 5 с; 8–10 повторений, 2 подхода в день с акцентом на работу передней группы бедра.

4. Пассивное сгибание и разгибание в коленном суставе — в пределах допустимого объема движений (обычно $0\text{--}30^\circ$ в первые сутки), с учетом особенностей установленного спейсера и мышечного баланса; 5–10 повторений, 2 раза в день.

5. Дыхательная гимнастика — диафрагмальное дыхание, упражнения с расширителем грудной клетки для профилактики застойных явлений в легких.

Основной этап восстановительного лечения (5–21 сутки)

По мере стабилизации состояния, при отсутствии признаков воспалительных осложнений и при условии удовлетворительного состояния послеоперационной раны, с 5–7 суток после операции пациентов перевели на расширенный этап восстановительного лечения. Стандартная программа реабилитации (применяли в обеих группах) представлена в табл. 1.

Интерактивная реабилитационная программа (исследуемая группа)

В исследуемой группе наряду со стандартной программой применяли специализированную интерактивную реабилитацию на системе Walker View 3.0 SCX (TecnoBody S.r.l., Италия). Данное оборудование представляет собой интегрированную платформу, включающую инструментированную беговую дорожку с встроенными датчиками нагрузки, оптическую систему 3D-анализа движений с четырьмя камерами, сенсорную поверхность для оценки распределения опорной реакции и программное обеспечение для анализа и тренировки походки в реальном времени.

Тренировки на системе Walker View проводили ежедневно, начиная с 5–7 суток после операции (при условии заживления послеоперационной раны и отсутствии признаков активного воспалительного процесса). Продолжительность одной сессии составляла 20–30 мин. Все тренировочные сессии проводили при обязательном использовании дополнительной опоры. На начальном этапе (5–10 сутки) пациенты выполняли ходьбу на беговой дорожке с опорой на боковые поручни платформы Walker View, обеспечивавшие устойчивое положение и страховку от потери равновесия. Нагрузку на оперированную конечность дозировали в соответствии с индивидуальным протоколом, учитывающим тип установленного артикулирующего спейсера и состояние послеоперационной раны. По мере восстановления опороспособности и повышения уверенности пациента в ходьбе степень опоры на поручни постепенно снижали. Контроль осевой нагрузки осуществляли посредством встроенных датчиков давления платформы Walker View, что позволяло в реальном времени контролировать распределение веса тела между конечностями и не допускать превышения допустимого уровня нагрузки на оперированную сторону.

Каждое занятие включало три последовательных этапа.

Первый этап — базовый анализ походки (Gait Analysis). В начале каждой сессии пациенты выполняли стандартизированный тест ходьбы для регистрации исходных параметров. Пациент совершал проходы по беговой дорожке в комфортном самостоятельно выбранном темпе. Система автоматически регистрировала следующие параметры: длину шага и ее симметрию между оперированной и контралатеральной конечностями;

Таблица 1. Стандартная программа реабилитации, применяемая на этапе медицинской реабилитации

Компонент	Краткое описание вмешательства	Параметры применения	Целевое действие
Криотерапия	Локальное охлаждение области коленного сустава	15–20 мин, 2–3 раза/сут; t° $-5...+5^{\circ}C$	Снижение боли и отека, контроль воспаления
Пассивная мобилизация (CPM)	Механическая пассивная разработка сустава на аппарате Artromot с постепенным увеличением амплитуды	20–30 мин, 2–3 раза/сут; прирост $5-10^{\circ}$ /сут	Профилактика контрактур, поддержание ROM
Пневмокомпрессионный лимфодренаж	Последовательная пневмокомпрессия нижней конечности	30 мин, 1–2 раза/сут; давление 40–60 мм рт. ст.	Снижение отека, улучшение лимфоток
Лечебная физкультура (ЛФК)	Активные упражнения для мышц бедра, голени, ягодиц с использованием эспандеров и собственного веса	30–40 мин/день; 2–3 серии по 10–15 повторений	Восстановление силового баланса и опорной функции
Электростимуляция мышц	Нейромышечная электростимуляция <i>m. quadriceps femoris</i> и <i>m. gastrocnemius</i>	Частота 30–50 Гц, импульс 250–300 мкс, 15–20 мин	Профилактика атрофии, восстановление активации
Массаж мягких тканей	Классический и лимфодренажный массаж мышц бедра и голени	15–20 мин/день, курс 10–14 процедур	Улучшение микроциркуляции, снижение мышечного тонуса
Дозированная ходьба	Обучение технике ходьбы с постепенным увеличением дистанции	10–15 мин, 2 раза/сут; опора согласно протоколу спейсера	Нормализация паттернов ходьбы, ранняя мобилизация

длительность фаз опоры и переноса; скорость передвижения и каденс; пространственные параметры движения таза и туловища (латеральные смещения, ротацию); кинематические характеристики тазобедренного и коленного суставов (амплитуду движений в сагиттальной плоскости); распределение опорной реакции между конечностями. Полученные данные использовали для определения индивидуальных целевых показателей текущей тренировочной сессии.

Второй этап — основной тренировочный модуль (Gait Trainer). Реализовывали режим интерактивного обучения с визуальной биологической обратной связью в реальном времени. На экран перед пациентом выводили целевые параметры шага и фазы цикла ходьбы, которые необходимо было достичь. Тренировка включала следующие компоненты.

1. Коррекция симметрии длины шага — визуализация разницы между длиной шага оперированной и здоровой конечности с целью выравнивания показателей.

2. Оптимизация фазовой структуры ходьбы — увеличение времени опоры на оперированную конечность и нормализация момента отталкивания.

3. Контроль латеральных колебаний туловища и ротации таза — визуальное отображение отклонений центра массы от средней линии с обратной связью о точности поддержания траектории.

4. Восстановление оси нижней конечности — стабилизация траектории движения коленного сустава в сагиттальной плоскости и коррекция варусных/вальгусных отклонений.

5. Кинематически ориентированные упражнения — выполнение движений с визуализацией угловых параметров коленного сустава для восстановления амплитуды сгибания-разгибания.

6. Нормализация распределения нагрузки — контроль симметрии опорной реакции, регистрируемой датчиками давления встроеной платформы.

Для обеспечения физиологичности и безопасности движений использовали технологию SCX Speed Control (Self-Controlled Speed), автоматически адаптирующую скорость полотна беговой дорожки под естественный темп шага пациента. Это исключало необходимость принудительного поддержания заданной скорости и снижало риск дисбаланса.

Третий этап — заключительная оценка (Session Report). По завершении тренировки пациент получал сводную

визуальную оценку достигнутых изменений по ключевым параметрам: длине шага, симметрии фаз, скорости передвижения, латеральной стабильности и угловой кинематике суставов. Эти данные сохраняли в системе и использовали для последующей коррекции тренировочных задач на следующих занятиях.

Применение интерактивной программы Walker View было направлено на раннее формирование физиологичного паттерна походки, уменьшение асимметрии движений между конечностями, улучшение нейромышечного контроля и восстановление опорной функции конечности в условиях функционирования артикулирующего временного спейсера.

Методы оценки эффективности

Эффективность реализованной реабилитационной программы оценивали на основании комплексного анализа функционального состояния оперированной конечности, кинематических характеристик походки, нейромышечной активности, параметров постральной устойчивости и показателей качества жизни (табл. 2). Обследование проводили в две временные точки: исходно — в раннем послеоперационном периоде (в течение первых суток после выполнения первого этапа ревизионной артропластики, до начала активной фазы реабилитации) и повторно — по завершении трехнедельного курса стационарной реабилитации. Все методики были стандартизированы и выполнялись по единому протоколу для пациентов обеих групп квалифицированным специалистом, прошедшим обучение работе с используемым оборудованием.

Оценка объема движений в коленном суставе

Амплитуду активного сгибания и разгибания в коленном суставе определяли с использованием автоматизированного комплекса пассивной разработки сустава Артромот ОРМЕД FLEX-F01 Active (ООО «Ормед», Россия). Исследование проводили в положении пациента лежа на спине с фиксацией тазобедренного сустава в сгибании 90° для исключения компенсаторных движений. Регистрировали максимальные углы активного сгибания и разгибания, допустимые без выраженного усиления болевого синдрома. Каждое измерение выполняли трижды, для анализа использовали среднее значение. Погрешность измерения составляла $\pm 1^{\circ}$.

Таблица 2. Методы оценки реабилитационного лечения

Метод	Измеряемые параметры	Инструмент / оборудование	Цель применения
Измерение объема движений (ROM)	Угол активного сгибания и разгибания коленного сустава	Артрометр OPMEД FLEX-F01 Active (Россия)	Оценка восстановления подвижности и профилактики контрактур
Электромиография (ЭМГ)	Амплитуда произвольных сокращений <i>m. quadriceps femoris</i> и <i>m. gastrocnemius</i>	Neuro-MVP-4 (Россия)	Анализ нейромышечной активации и мышечного тонуса
Анализ походки	Длина шага, скорость передвижения, длительность фазы опоры, коэффициент симметрии шага	Walker View 3.0 SCX (Италия)	Оценка восстановления двигательного стереотипа и параметров походки
Стабилометрия	Центр давления, амплитуда колебаний, предел устойчивости, интегральная стабильность	Huber 360 (Франция)	Диагностика постуральной устойчивости (не входило в программу реабилитации)
Клинические опросники	SF-36: качество жизни; WOMAC: боль, скованность, функция; KSS: клинические и функциональные показатели сустава	Бумажные формы	Комплексная оценка клинической эффективности и функционального статуса

Электромиографическое исследование

Функциональное состояние мышц нижней конечности оценивали методом поверхностной электромиографии на аппарате Neuro-MVP-4 (НПП «Медицинская компьютерная техника», Россия). Регистрацию биопотенциалов проводили с мышц передней поверхности бедра (*m. quadriceps femoris*, прямая головка) и икроножной мышцы (*m. gastrocnemius*, медиальная головка) на оперированной стороне. Электроды размещали над мышечным брюшком в соответствии с анатомическими ориентирами после обработки кожи спиртовым раствором. Анализировали амплитуду (мкВ) произвольных мышечных сокращений при стандартизированных изометрических пробах: разгибание коленного сустава против сопротивления (для *m. quadriceps*) и подъем на носки стоя (для *m. gastrocnemius*). Длительность регистрации — 5 с, усиление — 1000 мкВ/дел. Каждую пробу выполняли трижды с интервалом 30 с.

Анализ временно-пространственных параметров походки

Кинематические и временно-пространственные характеристики походки оценивали на системе Walker View 3.0 SCX (TecnoBody S.r.l., Италия). Пациент выполнял ходьбу в комфортном самостоятельно выбранном темпе по инструментированной беговой дорожке длиной 150 см. Регистрировали следующие параметры: длину шага (см), скорость передвижения (м/с), длительность фазы опоры оперированной конечности (мс), длительность фазы переноса оперированной конечности (мс) и коэффициент симметрии шага между оперированной и контралатеральной конечностями.

Тестирование проводили после двухминутной адаптации к беговой дорожке. Регистрацию выполняли в течение 30 с непрерывной ходьбы. Для анализа использовали средние значения параметров стабильного цикла ходьбы (не менее 10 последовательных шагов).

Стабилометрическое исследование

Постуральную устойчивость и равновесные реакции оценивали на стабилометрическом комплексе Huber 360 (LPG Systems, Франция). Исследование включало следующие тесты:

1) статический тест — регистрация отклонений центра давления (ЦД) в положении стоя на двух ногах с открытыми глазами в течение 30 с;

2) статодинамический тест — оценка предела устойчивости при выполнении наклонов туловища вперед, назад и вбок.

Регистрировали следующие параметры: площадь эллипса рассеяния ЦД (мм²), амплитуду колебаний туловища в фронтальной и сагиттальной плоскостях (мм), интегральный показатель общей стабильности (%), предел устойчивости (% от максимально возможного наклона). Стабилометрическое исследование выполняли исключительно в диагностических целях; оборудование Huber 360 не использовали в качестве элемента реабилитационной программы.

Клинические опросники

Клиническую эффективность реабилитации и ее влияние на качество жизни оценивали с использованием валидированных русскоязычных версий опросников.

1. Шкала SF-36 (Medical Outcomes Study 36-Item Short-Form Health Survey) — для комплексной оценки физического и психического компонентов качества жизни. Анализировали суммарный балл физического компонента здоровья как наиболее чувствительный к изменениям двигательной функции в раннем послеоперационном периоде.

2. Опросник WOMAC (Western Ontario and McMaster Universities Osteoarthritis Index) — для оценки выраженности боли (5 вопросов), скованности (2 вопроса) и физической функции (17 вопросов) в коленном суставе. Использовали индекс версии Likert III (0–4 балла), максимальный суммарный балл — 96 (чем выше, тем хуже состояние).

3. Шкала KSS (Knee Society Score) — для оценки клинического статуса коленного сустава (Knee Score, максимум 100 баллов) и функциональной способности (Function Score, максимум 100 баллов).

Все опросники заполнялись пациентами самостоятельно под контролем исследователя, исключавшего влияние на ответы.

Стандартизация измерений

Для минимизации межоператорной вариабельности все исследования проводил один и тот же сертифицированный специалист, не участвовавший в выполнении реабилитационного протокола. Перед началом каждого этапа исследования выполняли калибровку аппаратуры в соответствии с инструкциями производителя. Все количественные показатели измеряли не менее трех

Таблица 3. Результаты оценки функционального состояния после курса реабилитации

Показатель	Исслед. группа (до)	Исслед. группа (после)	Контр. группа (до)	Контр. группа (после)	<i>p</i> между группами
Сгибание в коленном суставе, °	60 ± 7	78 ± 6	58 ± 8	71 ± 7	0,01
Разгибание в коленном суставе, °	166 ± 4	176 ± 2	165 ± 5	173 ± 3	0,04
ЭМГ квадрицепса, мкВ	152 ± 17	179 ± 16	148 ± 18	165 ± 16	0,01
Длина шага оперированной конечности, см	46 ± 5	54,2 ± 5	44 ± 5	49,5 ± 5	0,01
Скорость ходьбы, м/с	0,61 ± 0,06	0,70 ± 0,05	0,59 ± 0,07	0,65 ± 0,05	0,02
Фаза опоры оперированной конечности, мс	767 ± 49	690 ± 51	762 ± 52	714 ± 48	0,01
Фаза переноса оперированной конечности, мс*	412 ± 38	371 ± 34	415 ± 40	390 ± 37	0,04
Коэффициент симметрии шага	0,82 ± 0,06	0,94 ± 0,04	0,81 ± 0,07	0,89 ± 0,05	0,015
Отклонение центра давления, мм	23 ± 4	18 ± 3	22 ± 4	20 ± 3	0,08
Амплитуда колебаний, мм	12 ± 2	10,8 ± 2	11 ± 2	10 ± 2	0,07
Общая стабильность, %	66 ± 9	80 ± 8	64 ± 9	72 ± 7	0,01
Предел устойчивости, %	61 ± 7	76 ± 7	60 ± 7	68 ± 7	0,01
SF-36, баллы	41 ± 7	51 ± 8	39 ± 8	47 ± 7	0,01
WOMAC, баллы	66 ± 8	46 ± 11	65 ± 9	52 ± 10	0,06
KSS, баллы	56 ± 9	81 ± 8	55 ± 9	76 ± 8	0,07

Примечание: показатель разгибания в коленном суставе представлен как величина внешнего угла; значению 180° соответствует полное разгибание. Увеличение показателя отражает уменьшение дефицита разгибания. *p* — уровень статистической значимости межгрупповых различий; ЭМГ — электромиография.

раз, для статистического анализа использовали среднее арифметическое значение. Время суток исследования (утро или день) было стандартизировано для всех пациентов.

Конечные точки исследования

Первичной конечной точкой считали показатель активного сгибания в коленном суставе через 21 день стационарной реабилитации. Вторичными конечными точками были показатель активного разгибания, амплитуда ЭМГ *m. quadriceps femoris*, длина шага, скорость ходьбы, длительность фазы опоры, интегральные показатели поструральной устойчивости, а также результаты опросников SF-36, WOMAC и KSS.

Статистическая обработка данных

Статистическую обработку данных проводили с использованием программы IBM SPSS Statistics, версия 26.0 (IBM Corp., США). Проверку распределения количественных данных на соответствие нормальному закону выполняли с применением критерия Шапиро–Уилка. При нормальном распределении вычисляли средние значения и стандартные отклонения ($M \pm SD$), при отклонении от нормального — медиану и межквартильный размах ($Me [Q_1; Q_3]$). Межгрупповые различия между исследуемой и контрольной группами оценивали с использованием: независимого *t*-критерия Стьюдента для количественных данных с нормальным распределением; критерия Манна–Уитни для количественных данных без нормального распределения; критерия χ^2 Пирсона или точного критерия Фишера для категориальных переменных.

Для оценки динамики внутри групп (до и после реабилитации) использовали: парный *t*-критерий при нормальном распределении разностей; критерий Уилкоксона при отсутствии нормальности.

Статистически значимыми считали различия при уровне значимости $p < 0,05$. Проверка гипотезы по первичной конечной точке носила подтверждающий характер. Анализ вторичных конечных точек рассматривали как исследовательский; полученные *p*-значения интерпретировали с учетом множественности сравниваемых показателей. Для минимизации систематических ошибок все расчеты проводил один специалист, не участвовавший в выполнении реабилитационного протокола и клиническом обследовании пациентов.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Средняя длительность функционирования первичного эндопротеза до развития перипротезной инфекции составила $7,2 \pm 2,8$ года в исследуемой группе и $7,5 \pm 3,1$ года в контрольной ($p = 0,64$). У всех пациентов диагноз хронической перипротезной инфекции был верифицирован в соответствии с критериями Musculoskeletal Infection Society (MSIS). Распределение пациентов по классификации Cierny–Mader не различалось между группами ($p = 0,78$).

Исходные значения всех оцениваемых параметров (объем движений, электромиографические показатели, параметры походки, стабилметрия, качество жизни) были статистически сопоставимы в исследуемой и контрольной группах на момент первого обследования (все $p > 0,05$), что позволило корректно оценить эффективность примененных реабилитационных программ.

Объем движений и нейромышечная активность

По завершении трехнедельного курса реабилитации в обеих группах отмечено достоверное увеличение амплитуды активных движений в коленном суставе (табл. 3). Прирост сгибания составил 30% от исходного уровня в исследуемой группе и 22% — в контрольной. Разгибание улучшилось на 6 и 5% соответственно. Межгрупповые различия по итоговым значениям достигли статистической

значимости как по сгибанию ($p = 0,010$), так и по разгибанию ($p = 0,040$).

Электромиографическое исследование выявило повышение амплитуды произвольных мышечных сокращений *m. quadriceps femoris* в обеих группах. Относительный прирост составил 17,8% в исследуемой группе и 11,5% в контрольной ($p = 0,010$ между группами). Для *m. gastrocnemius* наблюдалась аналогичная тенденция с меньшей разницей между группами. Увеличение амплитуды биопотенциалов свидетельствует о восстановлении нейромышечной активации после хирургического вмешательства.

Параметры походки

Временно-пространственные характеристики походки продемонстрировали положительную динамику в обеих группах. Длина шага увеличилась на 18% в исследуемой группе и на 12,5% в контрольной ($p = 0,010$ между группами). Скорость передвижения повысилась на 14,8 и 10,2% соответственно ($p = 0,020$).

Продолжительность фазы опоры на оперированную конечность сократилась в обеих группах ($p < 0,001$), что отражает восстановление доверия к оперированной конечности. Длительность фазы переноса оперированной конечности уменьшилась с 412 ± 38 мс до 371 ± 34 мс в исследуемой группе и с 415 ± 40 мс до 390 ± 37 мс в контрольной ($p = 0,040$ между группами), что свидетельствует о более уверенном контроле движения в период безопорной фазы. Коэффициент симметрии шага (отношение длины шага оперированной конечности к длине шага контралатеральной конечности) улучшился с 0,82 до 0,94 в исследуемой группе и с 0,81 до 0,89 в контрольной ($p = 0,015$ между группами).

Постуральная устойчивость

Интегральные показатели стабиллометрии достоверно повысились в обеих группах. Общая стабильность увеличилась на 21% в исследуемой группе и на 12,5% в контрольной ($p = 0,010$). Предел устойчивости повысился на 24,6 и 13,3% соответственно ($p = 0,010$).

Вместе с тем локальные параметры (амплитуда колебаний центра давления, отклонение центра давления) не продемонстрировали статистически значимых межгрупповых различий ($p = 0,070$ и $p = 0,080$). Это может свидетельствовать о том, что точностные характеристики пострального контроля требуют более длительного периода восстановления по сравнению с интегральными показателями.

Качество жизни и функциональный статус

Оценка по шкале SF-36 продемонстрировала улучшение физического компонента качества жизни в обеих группах. Абсолютный прирост составил 10 баллов в исследуемой группе и 8 баллов в контрольной ($p = 0,010$ между группами).

По опроснику WOMAC отмечено снижение суммарного балла (улучшение состояния) на 30% в исследуемой группе и на 20% в контрольной. Однако межгрупповые различия по итоговым значениям не достигли статистической значимости ($p = 0,060$). Аналогичная тенденция наблюдалась по шкале KSS: улучшение клинического статуса отмечено в обеих группах без достоверных межгрупповых различий ($p = 0,070$). Отсутствие значимых различий по данным

шкалам может быть связано с ограничением нагрузки, обусловленным наличием временного спейсера, а также с недостаточной чувствительностью инструментов в ранний послеоперационный период.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученные данные отражают особенности функциональной динамики у пациентов после первого этапа двухэтапной ревизионной артропластики коленного сустава. В обеих группах отмечено увеличение амплитуды движений и повышение параметров мышечной активности, что соответствует ожидаемому течению восстановительного периода. При этом различия между группами указывают на разную степень выраженности этих изменений. Увеличение амплитуды сгибания и разгибания может быть связано как с постепенным снижением послеоперационного болевого синдрома, так и с адаптацией околоуставных тканей к новым биомеханическим условиям [13]. Наблюдаемые межгрупповые различия после завершения курса реабилитации позволяют предположить, что способы организации двигательной активности могут по-разному влиять на восстановление объема движений [14].

Полученные результаты следует интерпретировать с учетом специфики межэтапного периода после первого этапа двухэтапной ревизионной артропластики. В отличие от пациентов после первичного эндопротезирования, у больных с артикулирующим временным спейсером восстановление функции закономерно ограничено необходимостью щадящей нагрузки, сохранением послеоперационных мягкотканых изменений и осторожным расширением двигательного режима. В этой связи более ранний отклик объективных двигательных показателей — объема движений, ЭМГ и временно-пространственных параметров походки — представляется ожидаемым, тогда как клинические шкалы WOMAC и KSS могут быть менее чувствительны в ранние сроки наблюдения.

Изменения показателей электромиографии свидетельствуют о постепенном восстановлении нейромышечной активации. Рост амплитуды биопотенциалов квадрицепса в обеих группах соответствует характерным процессам реиннервации и нормализации мышечного тонуса после хирургического вмешательства [15–17]. Статистические различия между группами после лечения позволяют предположить, что тип используемых упражнений и характер двигательного задания могут оказывать влияние на включение мышечных групп в работу и на формирование двигательного ответа. Межгрупповые различия после курса лечения позволяют рассматривать разные модели реабилитации как фактор, влияющий на скорость изменения кинематических характеристик [18–19].

Показатели стабиллометрии имели менее выраженную динамику по сравнению с параметрами походки и ROM. Это может объясняться тем, что постральный контроль у пациентов после первого этапа ревизионной артропластики зависит не только от состояния оперированной конечности, но и от компенсаторных механизмов со стороны интактных сегментов [20].

Изменения по шкалам качества жизни также были однонаправленными и соответствовали снижению выраженности функциональных ограничений. Различия между группами по итоговым значениям показателя SF-36 отражают влияние двигательной активности на субъективную оценку повседневных функций. В то же

время отсутствие статистически значимых различий по WOMAC и KSS может быть связано с ограничением нагрузки, обусловленным наличием временного спейсера, а также с тем, что данные шкалы чувствительнее на более поздних этапах реабилитации [21].

Временно-пространственные характеристики походки демонстрировали однонаправленную динамику. Увеличение длины шага, скорости движения и снижение продолжительности фазы опоры отражают постепенное восстановление основных параметров циклического двигательного стереотипа [22].

В условиях функционирования артикулирующего спейсера такие параметры тесно связаны с особенностями распределения нагрузки и степенью участия оперированной конечности в переносе массы тела.

Отдельные параметры (общая стабильность, предел устойчивости) демонстрировали различия между группами, тогда как локальные показатели (амплитуда колебаний, отклонение центра давления) оставались сопоставимыми. Это согласуется с тем, что в ранние сроки послеоперационного периода более быстро изменяются интегральные показатели устойчивости, тогда как точностные и локальные параметры стабилизации требуют большего времени для восстановления [23].

Комплексная интерпретация результатов позволяет рассматривать двигательные параметры (ROM, ЭМГ, характеристики походки) как более лабильные к изменениям в ранний восстановительный период. Постуральная устойчивость и клинические шкалы показывают иную динамику, что отражает неоднородность процессов восстановления при использовании артикулирующего спейсера и необходимость дифференцированного подхода к оценке эффективности реабилитации.

Результаты сопоставимы с данными предыдущих исследований, подтверждающих значение многоуровневого восстановительного подхода при ревизионной артропластике. Сравнение с литературными данными показывает, что полученные показатели объема движений (сгибание 71–78°) соответствуют ожидаемым значениям для пациентов с артикулирующим временным спейсером в ранний послеоперационный период [7]. При этом они несколько ниже, чем после окончательного эндопротезирования (обычно 90–110°), что объясняется конструктивными особенностями временного имплантата и необходимостью ограничения нагрузки в межэтапном периоде.

Настоящее исследование имеет ряд ограничений. Во-первых, исследование проведено на базе одного клинического центра, что может ограничивать обобщаемость результатов. Во-вторых, период наблюдения составил 21 день стационарного этапа реабилитации; долгосрочные исходы, в том числе после второго этапа ревизионной артропластики, не оценивались. В-третьих, относительно небольшой объем выборки (87 пациентов) мог быть недостаточным для выявления межгрупповых различий по клиническим шкалам WOMAC и KSS, характеризующимся меньшей чувствительностью в ранние сроки. Несмотря на ослепление при оценке первичных исходов, полное ослепление пациентов и исследователей относительно вида реабилитационной программы не представлялось возможным в связи со спецификой вмешательства.

Выводы

Проведено проспективное рандомизированное контролируемое исследование сравнения комплексной реабилитационной программы с включением интерактивных технологий биологической обратной связи (Walker View) и стандартной программы у пациентов после первого этапа двухэтапной ревизионной артропластики коленного сустава при хронической перипротезной инфекции. Установлено, что в трехнедельный межэтапный период в исследуемой группе отмечено статистически значимое превышение показателей объема движений, нейромышечной активности, временно-пространственных характеристик походки и интегральных показателей постуральной устойчивости по сравнению с контрольной группой. Локальные параметры стабиллометрии и клинические шкалы WOMAC и KSS достоверных межгрупповых различий не показали. Полученные данные свидетельствуют о различной динамике восстановления в зависимости от применяемой реабилитационной модели и указывают на необходимость дифференцированного подхода к оценке функционального состояния в условиях временного спейсера. Направлениями дальнейших исследований являются оценка долгосрочных результатов после второго этапа операции, влияние модели реабилитации на частоту осложнений и разработка критериев готовности к окончательному эндопротезированию.

Литература

1. Чилилов А., Михайлова Ю., Зеленова О., Стерликов С., Осков Ю. Эпидемиология остеоартрозов в Российской Федерации и прогноз ее развития в постковидный период. Социальные аспекты здоровья населения. 2025; 71 (2): 21–21. DOI: 10.21045/2071-5021-2025-71-2-21.
2. Alrayes MM, Sukeik M. Two-stage revision in periprosthetic knee joint infections. *World J Orthop.* 2023; 14 (3): 113–22. DOI: 10.5312/wjo.v14.i3.113.
3. Ayoade F, Li D, Mabrouk A, Todd JR. Periprosthetic Joint Infection. *StatPearls, Treasure Island (FL): StatPearls Publishing, 2025.* (Просмотрено: 21 февраль 2026 г.) Available from: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK448131/>.
4. Lakpriya S, De C, Tahir M, Sanka SK, Pierce TP, Gwam C. Etiology of Failure in Revision Total Knee Arthroplasty: A Systematic Review and Meta-Analysis. *J Arthroplasty.* 2025; S0883-5403(25)00836-8. DOI: 10.1016/j.arth.2025.06.085.
5. Iorio R, et al. A Modified Technique for Two-Stage Revision in Knee PJI Treatment. *J Clin Med.* 2023; 12 (23): 7323. DOI: 10.3390/jcm12237323.
6. Kulchitskaya DB, Fesyun AD, Samoilov A., Kolbakhova SN. The Physical Factors Application in Rehabilitation Programs for Patients after Total Knee Replacement. *Bull Rehabil Med.* 2022; 21 (2): 46–52. DOI: 10.38025/2078-1962-2022-21-2-46-52.
7. Kim YS, Bae KC, Cho CH, Lee KJ, Sohn E, Kim BS. Two-stage revision using a modified articulating spacer in infected total knee arthroplasty. *Knee Surg Relat Res.* 2013; 25 (4): 180–85. DOI: 10.5792/ksrr.2013.25.4.180.
8. Irani JL, et al. Clinical practice guidelines for enhanced recovery after colon and rectal surgery from the American Society of Colon and Rectal Surgeons and the Society of American Gastrointestinal and Endoscopic Surgeons. *Surg Endosc.* 2023; 37 (1): 5–30. DOI: 10.1007/s00464-022-09758-x.

9. Castellarin G, Merlini M, Bettinelli G, Riso R, Bori E, Innocenti B. Effect of an Innovative Biofeedback Insole on Patient Rehabilitation after Total Knee Arthroplasty. *Appl Sci.* 2022; 12 (5): 2456. DOI: 10.3390/app12052456.
10. Karaborklu Argut S, Celik D, Yasaci Z. Effectiveness of therapeutic electromyographic biofeedback after orthopedic knee surgeries: a systematic review. *Disabil Rehabil.* 2022; 44 (14): 3364–72. DOI: 10.1080/09638288.2020.1867904.
11. Bravi M, et al. Validity Analysis of WalkerViewTM Instrumented Treadmill for Measuring Spatiotemporal and Kinematic Gait Parameters. *Sensors.* 2021; 21 (14): 4795. DOI: 10.3390/s21144795.
12. Su S, He J, Wang R, Chen Z, Zhou F. The Effectiveness of Virtual Reality, Augmented Reality, and Mixed Reality Rehabilitation in Total Knee Arthroplasty: A Systematic Review and Meta-Analysis. *J Arthroplasty.* 2024; 39 (3): 582–90.e4. DOI: 10.1016/j.arth.2023.08.051.
13. Mizner RL, Petterson SC, Stevens JE, Vandeborne K, Snyder-Mackler L. Early quadriceps strength loss after total knee arthroplasty. The contributions of muscle atrophy and failure of voluntary muscle activation. *J Bone Joint Surg Am.* 2005; 87 (5): 1047–53. DOI: 10.2106/JBJS.D.01992.
14. Bade MJ, Stevens-Lapsley JE. Early high-intensity rehabilitation following total knee arthroplasty improves outcomes. *J Orthop Sports Phys Ther.* 2011; 41 (12): 932–41. DOI: 10.2519/jospt.2011.3734.
15. Stevens-Lapsley JE, et al. Relationship between intensity of quadriceps muscle neuromuscular electrical stimulation and strength recovery after total knee arthroplasty. *Phys Ther.* 2012; 92 (9): 1187–96. DOI: 10.2522/ptj.20110479.
16. Sklempe Kokic I, Vuksanic M, Kokic T, Peric I, Duvnjak I. Effects of Electromyographic Biofeedback on Functional Recovery of Patients Two Months after Total Knee Arthroplasty: A Randomized Controlled Trial. *J Clin Med.* 2022; 11 (11): 3182. DOI: 10.3390/jcm11113182.
17. Armshaw B, Vaidya M, Mehta S. Surface electromyography-based biofeedback can facilitate recovery from total knee arthroplasty. *J Appl Behav Anal.* 2024; 57 (3): 560–73. DOI: 10.1002/jaba.1076.
18. Bravi M, et al. Supervised versus unsupervised rehabilitation following total knee arthroplasty: A systematic review and meta-analysis. *The Knee.* 2023. 40: 71–89. DOI: 10.1016/j.knee.2022.11.013.
19. Monsegue AP, Emans PC, Van Loon LJ, Verdijk LB. Resistance exercise training to improve post-operative rehabilitation in knee arthroplasty patients: A narrative review. *Eur J Sport Sci.* 2024; 24 (7): 938–49. DOI: 10.1002/ejsc.12114.
20. Szczypiór-Piasecka K, Adamczewska P, Kołodziej Ł, Ziętek P. The Temporal-Spatial Parameters of Gait After Total Knee Arthroplasty. *J Clin Med.* 2025; 14 (13): 4548. DOI: 10.3390/jcm14134548.
21. Tsed AN, Kozhevin AA, Mushtin NE. Current trends in early rehabilitation of patients after total hip and knee replacement. *Grek Bull Surg.* 2024; 183 (1): 60–65. DOI: 10.24884/0042-4625-2024-183-1-60-65.
22. Bezgodkov YA, Kornilov NN, Petukhov AI, et al. Biomechanical indicators of standing and walking in patients after total knee arthroplasty using computer navigation. *Traumatology and Orthopedics of Russia.* 2011; 4: 11–17. EDN: NLEHPE.
23. Sekirin AB. Protocol of early rehabilitation after arthroplasty of major joints (literature review). *Bull Rehabil Med.* 2019; 2: 51–57. EDN: VEYUBF.

References

1. CHililov A, Mihajlova Yu, Zelenova O, Sterlikov S, Oskov Yu. Epidemiologiya osteoartrozov v Rossijskoj Federacii i prognoz ee razvitiya v postkovidnyj period. *Social'nye aspekty zdorov'ya naseleniya.* 2025; 71 (2): 21–21. DOI: 10.21045/2071-5021-2025-71-2-21. Russian.
2. Alrayes MM, Sukeik M. Two-stage revision in periprosthetic knee joint infections. *World J Orthop.* 2023; 14 (3): 113–22. DOI: 10.5312/wjo.v14.i3.113.
3. Ayoade F, Li D, Mabrouk A, Todd JR. Periprosthetic Joint Infection. *StatPearls, Treasure Island (FL): StatPearls Publishing, 2025.* (Просмотрено: 21 февраль 2026 г.) Available from: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK448131/>.
4. Lakpriya S, De C, Tahir M, Sanka SK, Pierce TP, Gwam C. Etiology of Failure in Revision Total Knee Arthroplasty: A Systematic Review and Meta-Analysis. *J Arthroplasty.* 2025; S0883-5403(25)00836–8. DOI: 10.1016/j.arth.2025.06.085.
5. Iorio R, et al. A Modified Technique for Two-Stage Revision in Knee PJL Treatment. *J Clin Med.* 2023; 12 (23): 7323. DOI: 10.3390/jcm12237323.
6. Kulchitskaya DB, Fesyun AD, Samoilov A., Kolbakhova SN. The Physical Factors Application in Rehabilitation Programs for Patients after Total Knee Replacement. *Bull Rehabil Med.* 2022; 21 (2): 46–52. DOI: 10.38025/2078-1962-2022-21-2-46-52.
7. Kim YS, Bae KC, Cho CH, Lee KJ, Sohn E, Kim BS. Two-stage revision using a modified articulating spacer in infected total knee arthroplasty. *Knee Surg Relat Res.* 2013; 25 (4): 180–85. DOI: 10.5792/ksrr.2013.25.4.180.
8. Irani JL, et al. Clinical practice guidelines for enhanced recovery after colon and rectal surgery from the American Society of Colon and Rectal Surgeons and the Society of American Gastrointestinal and Endoscopic Surgeons. *Surg Endosc.* 2023; 37 (1): 5–30. DOI: 10.1007/s00464-022-09758-x.
9. Castellarin G, Merlini M, Bettinelli G, Riso R, Bori E, Innocenti B. Effect of an Innovative Biofeedback Insole on Patient Rehabilitation after Total Knee Arthroplasty. *Appl Sci.* 2022; 12 (5): 2456. DOI: 10.3390/app12052456.
10. Karaborklu Argut S, Celik D, Yasaci Z. Effectiveness of therapeutic electromyographic biofeedback after orthopedic knee surgeries: a systematic review. *Disabil Rehabil.* 2022; 44 (14): 3364–72. DOI: 10.1080/09638288.2020.1867904.
11. Bravi M, et al. Validity Analysis of WalkerViewTM Instrumented Treadmill for Measuring Spatiotemporal and Kinematic Gait Parameters. *Sensors.* 2021; 21 (14): 4795. DOI: 10.3390/s21144795.
12. Su S, He J, Wang R, Chen Z, Zhou F. The Effectiveness of Virtual Reality, Augmented Reality, and Mixed Reality Rehabilitation in Total Knee Arthroplasty: A Systematic Review and Meta-Analysis. *J Arthroplasty.* 2024; 39 (3): 582–90.e4. DOI: 10.1016/j.arth.2023.08.051.
13. Mizner RL, Petterson SC, Stevens JE, Vandeborne K, Snyder-Mackler L. Early quadriceps strength loss after total knee arthroplasty. The contributions of muscle atrophy and failure of voluntary muscle activation. *J Bone Joint Surg Am.* 2005; 87 (5): 1047–53. DOI: 10.2106/JBJS.D.01992.
14. Bade MJ, Stevens-Lapsley JE. Early high-intensity rehabilitation following total knee arthroplasty improves outcomes. *J Orthop Sports Phys Ther.* 2011; 41 (12): 932–41. DOI: 10.2519/jospt.2011.3734.
15. Stevens-Lapsley JE, et al. Relationship between intensity of quadriceps muscle neuromuscular electrical stimulation and strength recovery after total knee arthroplasty. *Phys Ther.* 2012; 92 (9): 1187–96. DOI: 10.2522/ptj.20110479.
16. Sklempe Kokic I, Vuksanic M, Kokic T, Peric I, Duvnjak I. Effects of Electromyographic Biofeedback on Functional Recovery of Patients Two Months after Total Knee Arthroplasty: A Randomized Controlled Trial. *J Clin Med.* 2022; 11 (11): 3182. DOI: 10.3390/jcm11113182.
17. Armshaw B, Vaidya M, Mehta S. Surface electromyography-based biofeedback can facilitate recovery from total knee arthroplasty. *J Appl Behav Anal.* 2024; 57 (3): 560–73. DOI: 10.1002/jaba.1076.
18. Bravi M, et al. Supervised versus unsupervised rehabilitation following total knee arthroplasty: A systematic review and meta-analysis. *The Knee.* 2023. 40: 71–89. DOI: 10.1016/j.knee.2022.11.013.
19. Monsegue AP, Emans PC, Van Loon LJ, Verdijk LB. Resistance exercise training to improve post-operative rehabilitation in knee arthroplasty patients: A narrative review. *Eur J Sport Sci.* 2024; 24 (7): 938–49. DOI: 10.1002/ejsc.12114.
20. Szczypiór-Piasecka K, Adamczewska P, Kołodziej Ł, Ziętek P. The Temporal-Spatial Parameters of Gait After Total Knee Arthroplasty. *J Clin Med.* 2025; 14 (13): 4548. DOI: 10.3390/jcm14134548.
21. Tsed AN, Kozhevin AA, Mushtin NE. Current trends in early rehabilitation of patients after total hip and knee replacement. *Grek Bull Surg.* 2024; 183 (1): 60–65. DOI: 10.24884/0042-4625-2024-183-1-60-65.
22. Bezgodkov YA, Kornilov NN, Petukhov AI, et al. Biomechanical indicators of standing and walking in patients after total knee arthroplasty using computer navigation. *Traumatology and Orthopedics of Russia.* 2011; 4: 11–17. EDN: NLEHPE.
23. Sekirin AB. Protocol of early rehabilitation after arthroplasty of major joints (literature review). *Bull Rehabil Med.* 2019; 2: 51–57. EDN: VEYUBF.