

DOI: <https://doi.org/10.17816/vto642295>

EDN: REISSN



# Моделирование клинической инструментальной системы объективной оценки функции стоп у пациентов с посттравматической деформацией голеностопного сустава и пяточной кости

А.К. Орлецкий, И.С. Косов, К.В. Шкуро, Д.О. Тимченко, Д.О. Васильев, Н.А. Гордеев, В.А. Жарииков

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

## АННОТАЦИЯ

**Обоснование.** Изменение походки пациента после оперативного лечения на голеностопном суставе и стопе связано с развитием биомеханически обусловленных осложнений. Результаты оперативного лечения зависят от правильной оценки анатомо-функциональных особенностей стопы. Клинический анализ ходьбы проводился с помощью компьютеризированного аппаратно-программного комплекса «F-Scan Mobile».

**Цель.** Оценить биомеханические показатели ходьбы у пациентов с деформацией голеностопного сустава и стоп до и после оперативного лечения.

**Материалы и методы.** В отделении травматологии и ортопедии № 4 ФГБУ «НМИЦ ТО им. Н.Н. Приорова» (г. Москва) в период 2022–2024 гг. проведено одноцентровое проспективное нерандомизированное когортное контролируемое экспериментальное количественное исследование. Были прооперированы 102 пациента с крузартрозом и посттравматической деформацией пяточной кости, из них 68 мужчин и 34 женщины, средний возраст которых составил  $39 \pm 17,61$  года. Также пациентам проводилась биомеханическая оценка функциональных параметров стопы.

**Результаты.** Оценка результатов лечения пациентов, принявших участие в исследовании, проводилась в интервале 12 и 24 мес. после операции. Средний период наблюдения составил  $22,3 \pm 9,42$  мес. Средний показатель визуально-аналоговой шкалы до операции составил  $6,5 \pm 3,63$ , после операции —  $1,6 \pm 0,81$ , отмечено значительное снижение болевого синдрома ( $p < 0,05$ ). Средний показатель AOFAS заднего отдела стопы до операции составил  $38 \pm 23,31$ , после операции —  $88 \pm 10,55$ , также отмечено улучшение показателей опросника ( $p < 0,05$ ). Субъективная оценка результатов лечения: 56 пациентов (54,9%) — отличный результат, 30 пациентов (29,4%) — хороший, 14 пациентов (13,7%) — удовлетворительный, 2 пациента (1,9%) оценили результат лечения как неудовлетворительный.

**Заключение.** Разработанная клиническая модель биомеханической оценки параметров ходьбы позволяет получать объективные данные о структуре цикла шага при одностороннем поражении стоп и оценить адекватность адаптивного двигательного навыка у больных до и после оперативного лечения и в отдалённом периоде наблюдений. Пациенты были удовлетворены результатом лечения, который был подтверждён не только клинически, но и путём биомеханического исследования.

**Ключевые слова:** анализ походки; крузартроз; посттравматическая деформация; подтаранный артродез; надлодыжечная остеотомия; эндопротезирование голеностопного сустава.

## Как цитировать:

Орлецкий А.К., Косов И.С., Шкуро К.В., Тимченко Д.О., Васильев Д.О., Гордеев Н.А., Жарииков В.А. Моделирование клинической инструментальной системы объективной оценки функции стоп у пациентов с посттравматической деформацией голеностопного сустава и пяточной кости // Вестник травматологии и ортопедии им. Н.Н. Приорова. 2025. Т. 32, № 4. С. 817–829. DOI: 10.17816/vto642295 EDN: REISSN

DOI: <https://doi.org/10.17816/vto642295>

EDN: REISSN

# Modeling a clinical instrumental system for objective assessment of foot function in patients with post-traumatic deformity of the ankle and calcaneus

Anatoliy K. Orletskiy, Igor S. Kosov, Konstantin V. Shkuro, Dmitriy O. Timchenko, Dmitriy O. Vasilyev, Nicolay A. Gordeev, Vladislav A. Jarikov

Priorov National Medical Research Center of Traumatology and Orthopedics, Moscow, Russia

## ABSTRACT

**BACKGROUND:** Gait alterations in patients after surgery on the ankle and foot are associated with biomechanically driven complications. The surgery outcomes depend on an accurate assessment of the anatomical and functional characteristics of the foot. Clinical gait analysis was performed using the computerized hardware-software system F-Scan Mobile.

**AIM:** This study aimed to evaluate biomechanical gait parameters in patients with deformities of the ankle and foot before and after surgery.

**METHODS:** A single-center, prospective, non-randomized, controlled, experimental, quantitative, cohort study was conducted at the Department of Traumatology and Orthopedics No. 4 of the Priorov National Medical Research Center of Traumatology and Orthopedics (Moscow) during 2022–2024. A total of 102 patients with ankle arthrosis and post-traumatic calcaneal deformity were treated, including 68 men and 34 women, a mean age of  $39 \pm 17.61$  years. All patients also underwent biomechanical assessment of functional foot parameters.

**RESULTS:** Treatment outcomes in patients included in the study were assessed 12 and 24 months after surgery. The mean follow-up period was  $22.3 \pm 9.42$  months. The mean visual analog scale score before surgery was  $6.5 \pm 3.63$ , and  $1.6 \pm 0.81$  after surgery, indicating a significant reduction in pain ( $p < 0.05$ ). The mean AOFAS hindfoot score increased from  $38 \pm 23.31$  preoperatively to  $88 \pm 10.55$  postoperatively, with a significant improvement in questionnaire scores ( $p < 0.05$ ). Subjective evaluation of treatment outcomes: 56 patients (54.9%) rated the results as excellent, 30 (29.4%) as good, 14 (13.7%) as satisfactory, and 2 (1.9%) as unsatisfactory.

**CONCLUSION:** The clinical model for biomechanical gait assessment provides objective data on the structure of the gait cycle in unilateral foot lesions and allows evaluating the adequacy of adaptive motor skills in patients before and after surgery, as well as during long-term follow-up. Patients were satisfied with the treatment outcomes, confirmed both clinically and through biomechanical assessment.

**Keywords:** gait analysis; ankle arthrosis; post-traumatic deformity; subtalar arthrodesis; supramalleolar osteotomy; ankle arthroplasty.

## To cite this article:

Orletskiy AK, Kosov IS, Shkuro KV, Timchenko DO, Vasilyev DO, Gordeev NA, Jarikov VA. Modeling a clinical instrumental system for objective assessment of foot function in patients with post-traumatic deformity of the ankle and calcaneus. *N.N. Priorov Journal of Traumatology and Orthopedics*. 2025;32(4):817–829. DOI: 10.17816/vto642295 EDN: REISSN

Received: 27.11.2024

Accepted: 03.09.2025

Published online: 09.10.2025

## ОБОСНОВАНИЕ

Анализ литературы свидетельствует о противоречивых взглядах на способы и алгоритмы хирургического лечения больных с различными стадиями крузартроза. Основные подходы можно разделить на две группы: операции, сохраняющие суставные поверхности, и операции, подразумевающие резекцию суставных поверхностей, или радикальные способы [1–4].

Основные разногласия исследователей прослеживаются в определении ведущих звеньев патогенеза. В ещё большей степени дискутируется вопрос о причинах неудовлетворительных исходов хирургической коррекции деформаций стопы и голеностопного сустава с развитием биомеханически обусловленных осложнений, например развития артроза в смежных суставах, рецидивирования болевого синдрома [4–7].

На наш взгляд, отрицательные результаты оперативного лечения могут быть связаны с недооценкой анатомо-функциональных особенностей стопы. Поскольку стопа имеет функционально обусловленное анатомическое строение, от её состояния напрямую зависит кинематика и кинетика ходьбы.

Основу стопы составляет её скелет, в котором выделяют следующие зоны: предплюсну, включающую таранную, пятую, кубовидную, ладьевидную и три клиновидных кости; плюсну, объединяющую пять плюсневых костей; пальцы.

По клинико-функциональному признаку выделяют задний, средний и передний отделы стопы.

Кости стопы, объединённые в суставах и укрепленные в них связками, образуют сводчатую форму стопы человека. Особое значение в поддержании этой формы имеют связки и подошвенный апоневроз. Роль активных стабилизаторов выполняют мышцы голени. Такое строение стопы предназначено для реализации её основных функций: опорной, балансирующей, амортизационной, толчковой, сенсорной [8].

Опорная функция заключается в способности стопы воспринимать нагрузку тела и обеспечивается в большей степени предплюсневой (в том числе пяточной) и плюсневой отделами, в меньшей — пальцами. При одностороннем поражении / снижении опорной функции развивается неустойчивость при опоре на стопу. В этом случае для сохранения равновесия в вертикальной позе нагрузка компенсаторно смещается на более опороспособную конечность. При этом общий центр масс (ОЦМ) также сместится в сторону более опороспособной конечности. В результате запас устойчивости в такой позе будет снижен, и тогда большее значение для сохранения равновесия будет иметь балансирующая функция стопы.

Балансирующая функция заключается в перераспределении опоры на стопу таким образом, чтобы удержать проекцию ОЦМ в пределах опорного контура (опорной поверхности стопы). Балансирующая функция достигается преимущественно за счёт супинационных и пронационных движений стопы.

Амортизационная (рессорная) функция выражается в способности стопы упруго расплываться под нагрузкой и возвращаться в исходное состояние после её снятия. Она обеспечивается арочным расположением костей стопы, упругим соединением их мышцами и связками. Особую роль в этом играет подошвенный апоневроз. Рессорная функция стопы способствует амортизации ударных нагрузок на элементы опорно-двигательного аппарата при ходьбе, беге и прыжках.

Толчковая функция стопы участвует в формировании импульса силы для отталкивания ног от опоры и придания ускорения телу.

Сенсорная функция участвует в передаче информации о наклоне и рельефе опорной поверхности, характере её воздействия на стопу. Тактильные и проприоцептивные анализаторы участвуют в обеспечении этой функции, необходимой для согласованной работы механизмов регуляции позы, формирования правильной структуры локомоций, предотвращения травматизации стопы. Сенсорная функция также имеет большое значение для реализации балансирующей функции стопы и является звеном системы функционального биоуправления мышечной активностью в реализации двигательных навыков [9].

С биомеханических позиций стопу целесообразно рассматривать не в виде отдельно взятого функционального образования, а как элемент сложной системы опорно-двигательного аппарата. Тезис неразрывности системы «стопа — конечность» в настоящее время не вызывает никакого сомнения. Стопа участвует в функции нижних конечностей, существенно определяя особенности походки. Посттравматические деформации стоп характеризуются анатомо-функциональными изменениями соотношений в сегментах конечностей и приводят к перестройке двигательного стереотипа, изменению характера нагрузки на стопу и переката [10].

Аналитический обзор литературы выявил очевидную связь между посттравматическими дегенеративными изменениями в голеностопном суставе и изменением оси конечности на уровне голеностопного сустава (варусная / вальгусная деформация) [11].

Вовлечение в патологический процесс активных стабилизаторов, сухожильно-мышечного и связочного аппарата способствует нестабильности в суставе и усугубляет развитие его деформации [12–14].

Для решения задач, поставленных в нашей работе, и объективной оценки биомеханических показателей ходьбы у больных проводили регистрацию параметров ходьбы при поступлении и после оперативного лечения.

## ЦЕЛЬ

Оценить биомеханические показатели ходьбы у пациентов с деформацией голеностопного сустава и стоп до и после оперативного лечения.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

### Дизайн исследования

Проведено одноцентровое проспективное нерандомизированное когортное контролируемое экспериментальное количественное исследование.

### Условия проведения и продолжительность исследования

В отделении травматологии и ортопедии № 4 ФГБУ «НМИЦ ТО им. Н.Н. Приорова» (г. Москва) в период 2022–2024 гг. было проведено оперативное лечение 102 пациентов с крузартрозом и посттравматической деформацией пяточной кости, из них 68 мужчин и 34 женщины, средний возраст которых составил  $39 \pm 17,61$  года.

### Критерии соответствия

#### Критерии включения:

- пациенты с крузартрозом I–III степени;
- пациенты с остеоартрозом подтаранного сустава, посттравматической деформацией пяточной кости;
- наличие согласия на участие в исследовании и опубликование медицинских данных в научных целях.

#### Критерии невключения:

- пациенты с имеющимся анкилозом голеностопного и подтаранного сустава;
- пациенты с тяжёлым сосудистым и неврологическим дефицитом, невропатическими заболеваниями (например, артропатией Шарко);
- отсутствие согласия на участие в исследовании и опубликование медицинских данных в научных целях.

### Описание методологии исследования

Пациентам с крузартрозом I–II степени при наличии асимметрии во фронтальной плоскости (вальгусная / варусная деформация) проводилось оперативное лечение в следующем объёме: закрыто- или открытоугольная надлодыжечная остеотомия ± корригирующая остеотомия бугра пяточной кости ( $n=22$ ).

Пациентам с крузартрозом III степени при наличии асимметрии во фронтальной плоскости до 15 градусов проводилось оперативное лечение в следующем объёме: первичное тотальное эндопротезирование голеностопного сустава ± корригирующая остеотомия бугра пяточной кости ( $n=28$ ).

Пациентам с остеоартрозом подтаранного сустава при наличии нулевого или отрицательного угла Белера и угла инклинации таранной кости менее 8 градусов проводилось оперативное лечение в следующем объёме: дистракционный костно-пластический артродез подтаранного сустава ( $n=18$ ).

Пациентам с остеоартрозом подтаранного сустава с углом Белера менее 15 градусов и углом инклинации таранной кости менее 20 градусов проводилось оперативное

лечение в следующем объёме: артродез подтаранного сустава ( $n=34$ ).

### Этическая экспертиза

Все пациенты подписали информированное согласие на лечение, включение в исследование и опубликование медицинских данных в научных целях. Детализирующая информация, способствующая персонификации включённых в исследование пациентов, отсутствует. По результатам рассмотрения документов Комитет по этике при ФГБУ «НМИЦ ТО им. Н.Н. Приорова» Минздрава России (протокол № 24/21 от 26 декабря 2021 года) принял решение об отсутствии нарушений норм биомедицинской этики при выполнении исследования и одобряет проведение данного клинического испытания.

### Статистический анализ

Статистический анализ выполнялся с использованием программного обеспечения Windows 10, с применением парного двухстороннего t-критерия для сравнения предоперационных и послеоперационных параметров. Нормальное распределение было подтверждено с помощью критерия хи-квадрат. Корреляция проводилась между оценкой по визуально-аналоговой шкале боли ВАШ, комплексной шкале оценки состояния стопы и голеностопного сустава (American Orthopaedic Foot and Ankle Score, AOFAS), результатами функциональных параметров стопы. Значимость предполагалась при  $p < 0,05$ .

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Клинический анализ ходьбы проводится с использованием аппаратно-программных комплексов, основанных на различных физических принципах регистрации локомоций. С целью стандартизации протоколов исследования разработан международный протокол клинического анализа ходьбы CGA (Clinical Gait Analysis). Протокол CGA в полном объёме включает временные, пространственные, кинематические и кинетические параметры ходьбы испытуемого [10].

В нашей работе клинический анализ ходьбы проводили с помощью компьютеризированного аппаратно-программного комплекса «F-Scan Mobile» фирмы «Tekscan» (США) с программным обеспечением «F-Scan Mobile Clinical 5.72» в операционной системе Windows XP (АПК F-Scan). Запись распределения центра давления в ходьбе производили в условиях закрытого биокинематического контура.

АПК F-Scan включает носимый испытуемым модуль регистрации давления стопами на стельки, размещённые в обуви пациента (рис. 1). Перед исследованием у всех пациентов берётся информированное добровольное согласие на публикацию медицинских данных в научных целях. Испытуемый (согласие на участие в исследовании от 24.02.2023 г.) свободно перемещается, при этом запись

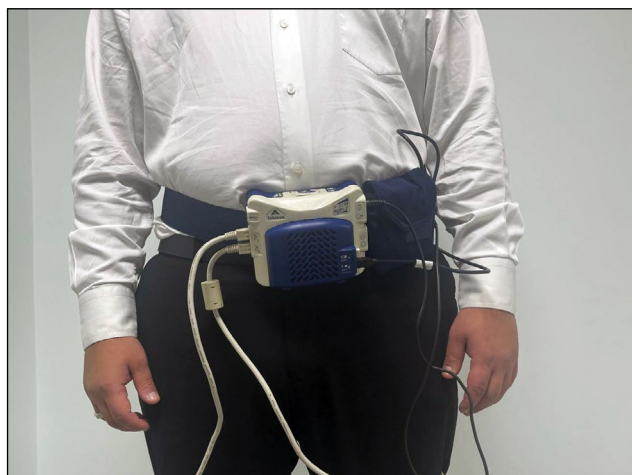


Рис. 1. Модуль регистрации АПК F-Scan, размещённый на испытуемом.  
Fig. 1. F-Scan registration module placed on the participant.

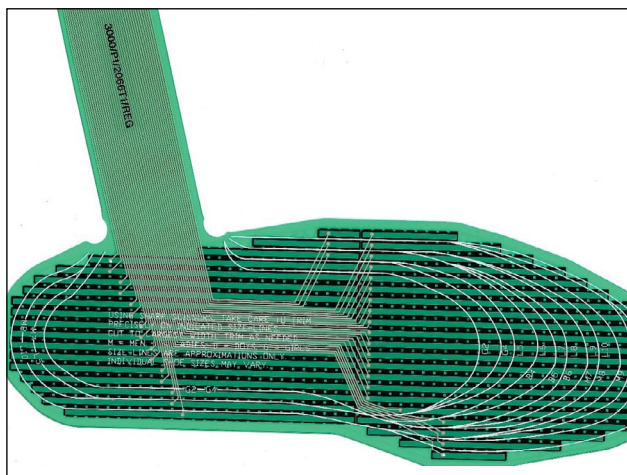


Рис. 2. Сенсорная подометрическая стелька с разметкой.  
Fig. 2. Sensor-based podometric insole with markings.

результатов производится в память носимого модуля F-Scan, а после тестирования передаётся в персональный компьютер для обработки.

Сенсорные стельки давления вырезаются по нанесённому контуру в соответствии с размером обуви (рис. 2).

Данный метод регистрации позволяет оценить функциональное состояние стопы, а именно: регистрировать распределение давления под стопами; построить графики интегральной нагрузки на стопы и оценить их структуру; определить ориентацию, плавность и длину траектории центра давления под каждой стопой и совместно для обеих стоп; отразить последовательность включения стоп в опору, а также оценить асимметрию и различие биомеханических характеристик (распределение давления, графиков интегральной нагрузки и траекторий центра давления под стопами) для левой и правой конечности.

На рис. 3 представлена траектория центра давления в циклах правого и левого шага.

Программное обеспечение предоставляет возможность измерить расстояние от переднего толчка до заднего, а также отклонение траектории центра давления от линии, соединяющей передний и задний толчки (рис. 4). Эти параметры позволяют объективно оценить распределение центра давления.

Распределение центров давления стоп отображается на графиках зависимости амплитуды центра давления от времени с цифровыми значениями пиков (рис. 5), а также в виде 3D-диаграмм (рис. 6).

Обработка графиков и показателей распределения центра давления при ходьбе позволяет рассчитывать временные параметры ходьбы, а именно: период опоры, период переноса, период двойной опоры, длительность и темп шага.

Таким образом, компьютеризированный аппаратно-программный комплекс «F-Scan Mobile» обеспечивает возможность регистрации временных и кинетических параметров ходьбы в соответствии с протоколом CGA

в сокращённом варианте, а также позволяет создать клиническую модель исследования ходьбы в основных и контрольной группах исследования.

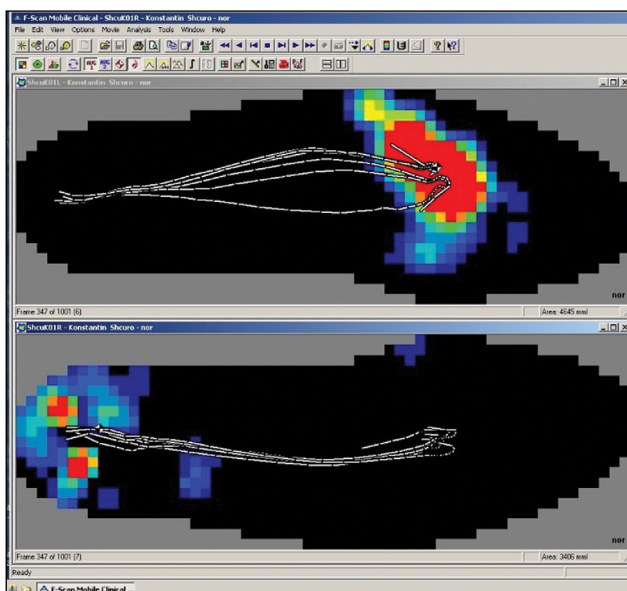


Рис. 3. Графическое отображение траектории центра давления в циклах правого и левого шага.

Fig. 3. Graphical representation of the center of pressure trajectory during right and left gait cycles.

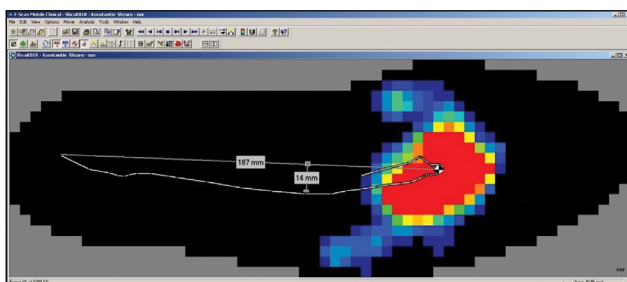


Рис. 4. Цифровые показатели траектории распределения центра давления.  
Fig. 4. Digital indicators of the center of pressure distribution trajectory.

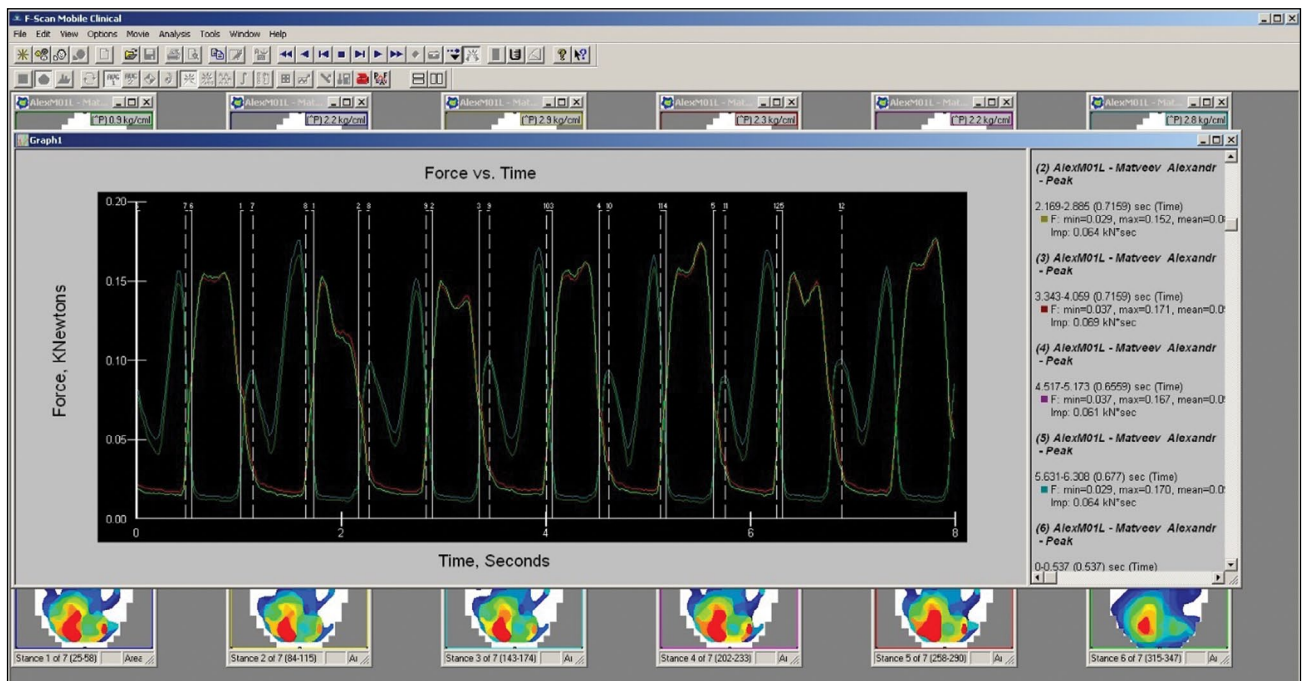


Рис. 5. График распределения центра давления при ходьбе.

Fig. 5. Pressure distribution curve during walking.

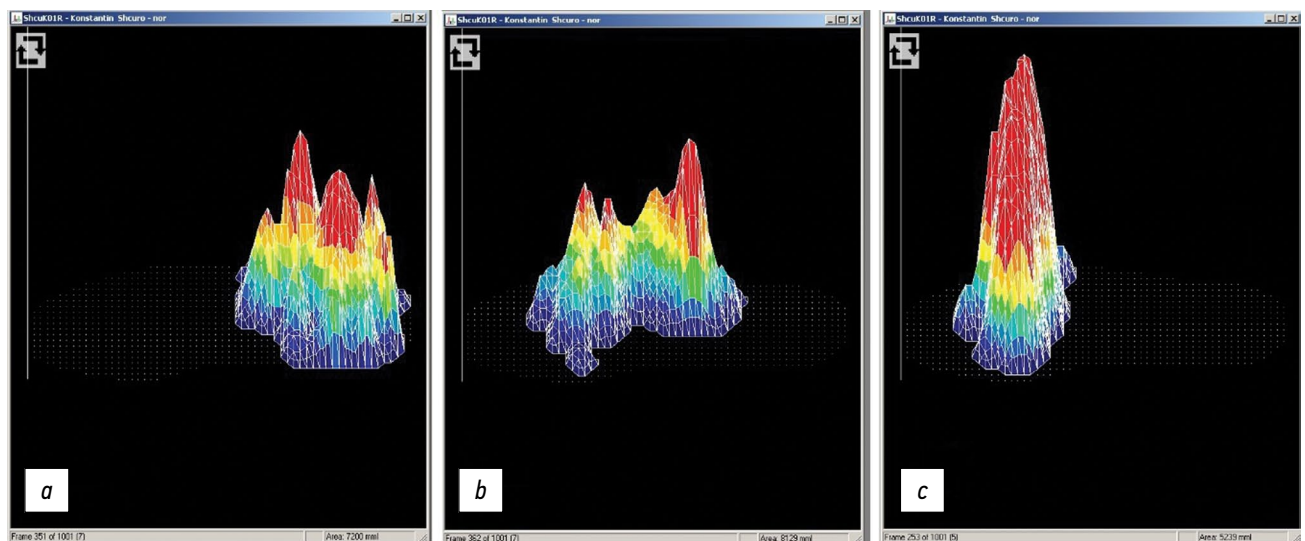


Рис. 6. 3D-представление распределения центра давления при ходьбе: *a* — передний толчок, *b* — перекал стопы, *c* — задний толчок.

Fig. 6. 3D representation of pressure distribution during walking: *a*, forefoot push-off; *b*, midfoot rollover; *c*, heel-off.

Исходно регистрацию показателей ходьбы выполняли, помещая динамометрические сенсорные стельки в личную обувь пациента. Однако в ряде случаев анализ записей траектории распределения центра давления выявил наличие артефактов, таких как вариабельность и нестабильность траектории, наличие возвратных моментов сил заднего толчка (рис. 7).

Наличие этих феноменов мы объясняли использованием пациентами при тестировании личной обуви. Учитывая то, что тестирование планируется несколько раз с течением времени, фактор явки пациентов в разной обуви (в том числе сезонной), а также возможность явки

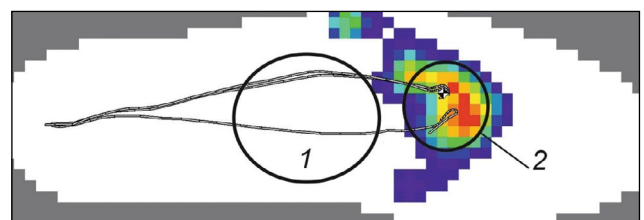


Рис. 7. Артефакты регистрации траектории распределения центра давления: 1 — вариабельность траектории, 2 — «возвратные» моменты сил заднего толчка.

Fig. 7. Artifacts of center of pressure trajectory registration: 1, trajectory variability; 2, return moments of heel push-off forces.



Рис. 8. Образец экспериментальной стандартизированной обуви.

Fig. 8. Example of experimental standardized footwear.

пациента в адаптированной обуви (наличие ортопедических супинаторов), для повышения точности регистрации было принято решение разработать стандартизированную обувь. Отправным пунктом являлось желание создать своего рода мобильную динамометрическую платформу с жёсткой плоской поверхностью для сенсорной стельки и сохранением возможности её сгибания при перекасте стопы.

Совместно с научно-производственным ортопедическим центром «Персей» с учётом разработанных медико-технических требований была изготовлена обувь на ортопедической колодке. Она имела 5 типов размеров — с 36-го по 44-й. На рис. 8 представлены образец разработанной экспериментальной обуви со стелькой на пациенте (получено информированное согласие от 24.02.2023 г.) и скомпонованный для тестирования комплекс «обувь — стелька».

Данное решение обеспечило возможность регистрации траектории распределения центра давления без артефактов и в стандартных (одинаковых) условиях независимо от времени и сезона проведения тестирования (рис. 9).

Для клинической биомеханической оценки параметров ходьбы был выработан следующий алгоритм:

1. Инструктаж пациента по планируемому клиническому тестированию. При инструктаже пациенту объясняется цель исследования, необходимость соблюдать средний темп и привычную ненапряжённую походку при ходьбе по ровной поверхности, при команде нужно нажать кнопку старта записи. При ходьбе на тредмиле — соблюдать правила безопасности, в случае неуверенности или потери равновесия воспользоваться аварийной стоп-кнопкой.
2. Заполнение паспортной части базы данных программы «F-Scan Mobile Clinical 5.72». При заполнении карточки пациента вводятся его ФИО, дата рождения, пол, присваивается уникальный ID-номер (рис. 10).
3. Размещение соответствующих размеру стелек в стандартизированной обуви. В соответствии с длиной стопы пациента подбираются стандартная обувь и сенсорные стельки, при размещении стельки и обувь обрабатываются антисептиком.

4. Экипирование пациента. На тестируемом фиксируется носимый модуль «F-Scan Mobile», стельки подключаются к коннекторам, соединительные провода фиксируются липкими лентами для обеспечения свободной ходьбы (рис. 11, а).
5. Программирование носимого модуля регистрации «F-Scan Mobile». Проводится калибровка сенсорных стелек. Модуль настраивается на запуск записи

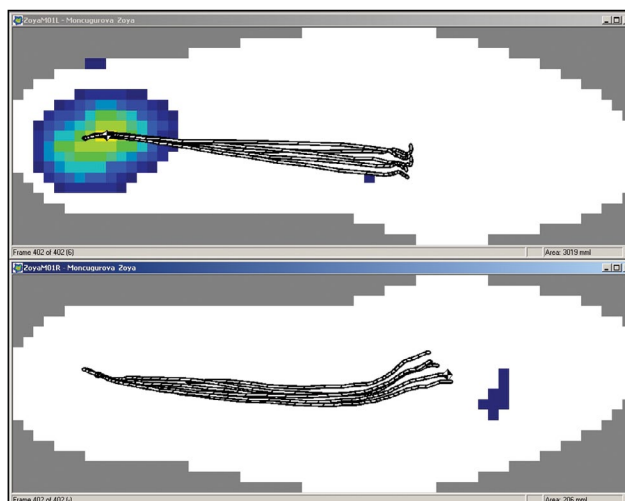


Рис. 9. Траектории распределения центра давления, записанные при использовании экспериментальной стандартизированной обуви.

Fig. 9. Center of pressure trajectories recorded with experimental standardized footwear.

Patient Info		
FIRST NAME:	Middle Name:	LAST NAME:
Ivan	Ivanovitch	Ivanov
Patient ID:	Date of Birth (dd.MM.yyyy):	Gender:
i1241	12 09 1962	<input type="radio"/> Female <input checked="" type="radio"/> Male
OK		
Cancel Help		

Рис. 10. Электронная карточка пациента.

Fig. 10. Electronic patient record.



Рис. 11. Тестирование пациента М.: *a* — экипировка пациента, *b* — ходьба по ровной поверхности, *c* — ходьба на тредмиле.

Fig. 11. Testing of patient M.: *a*, patient setup; *b*, walking on a flat surface; *c*, treadmill walking.

данных при нажатии пациентом кнопки триггера, запись длится 8 секунд.

6. Регистрация данных сенсорных стелек при ходьбе по ровной поверхности (в коридоре клиники). Пациент (согласие на исследование от 24.02.2023 г.) совершает проходы по коридору (20 м). Когда тестирующий убедится, что ходьба максимально свободная и непринуждённая, даётся команда нажать кнопку триггера (рис. 11, *b*).
7. Регистрация данных сенсорных стелек при ходьбе на медицинском тредмиле Enraf Nonius EN-Motion (Нидерланды). Тестируемый встаёт на ленту тредмила и держится за страховочные поручни. Устанавливается скорость ленты 1,5 км/час и начинается её движение. По мере адаптации к ходьбе на беговой дорожке пациент отпускает поручни, даётся команда нажать кнопку триггера (рис. 11, *c*).
8. Перенос записанных данных из носимого модуля «F-Scan Mobile» в персональный компьютер и просмотр треков в программе «F-Scan Mobile Clinical 5.72». Передача данных производится по подключаемому к носимому модулю кабелю USB, экипировка с пациента не снимается. Переданные в компьютер записи треков просматриваются.
9. При удовлетворительном качестве записей с пациента снимается экипировка, при наличии дефектов записи действия 5–9 повторяются.
10. Обработка полученных данных в программе «F-Scan Mobile Clinical 5.72» с определением объективных показателей ходьбы. Обработка данных проводится штатными программными модулями «F-Scan Mobile Clinical 5.72». Оценка опорной функции в комплексах биомеханического тестирования ходьбы, как правило, производится

посредством регистрации реакции опоры с использованием прецизионных динамометрических платформ, неподвижно установленных или вмонтированных в пол. В углах платформы установлены 4 тензодатчика. Калибровка проводится один раз при их производстве. Результатом измерений являются отображение ОЦМ, его значение и траектория в реальном времени. В первом приближении динамометрические платформы можно сравнить с цифровыми высокоточными весами, позволяющими с помощью специального программного обеспечения регистрировать распределение ОЦМ в 3D-проекции во времени. Результаты регистрации представляются в г, кг, N, kN и так далее в зависимости от выбора экспериментатора.

Сенсорные стельки «F-Scan» регистрируют давление посредством резистивного эффекта. На площади стельки равномерно распределено несколько сотен тензодатчиков, обладающих высокой чувствительностью и разрешающей способностью. Датчики регистрируют распределение давления в проекции контакта со стопой, отображают общий центр давления (ОЦД), его значение и траекторию в реальном времени. Результаты исследований в значительной степени представлены цветной иллюстративной графикой в 2D- и 3D-отображении. Вес тестируемого должен уложиться в количество градаций цвета, поэтому калибровка проводится индивидуально для каждого пациента. Цифровые данные при построении графиков обладают высокой точностью, но представлены в условных единицах давления (УЕД) — Raw Force.

На рис. 12 представлены графики зависимости момента центра давления от времени, а на рис. 13 — траектория центра давления при ходьбе по ровной поверхности. Постпроцессорная обработка включала разметку двух линий: первая соединяет передний и задний

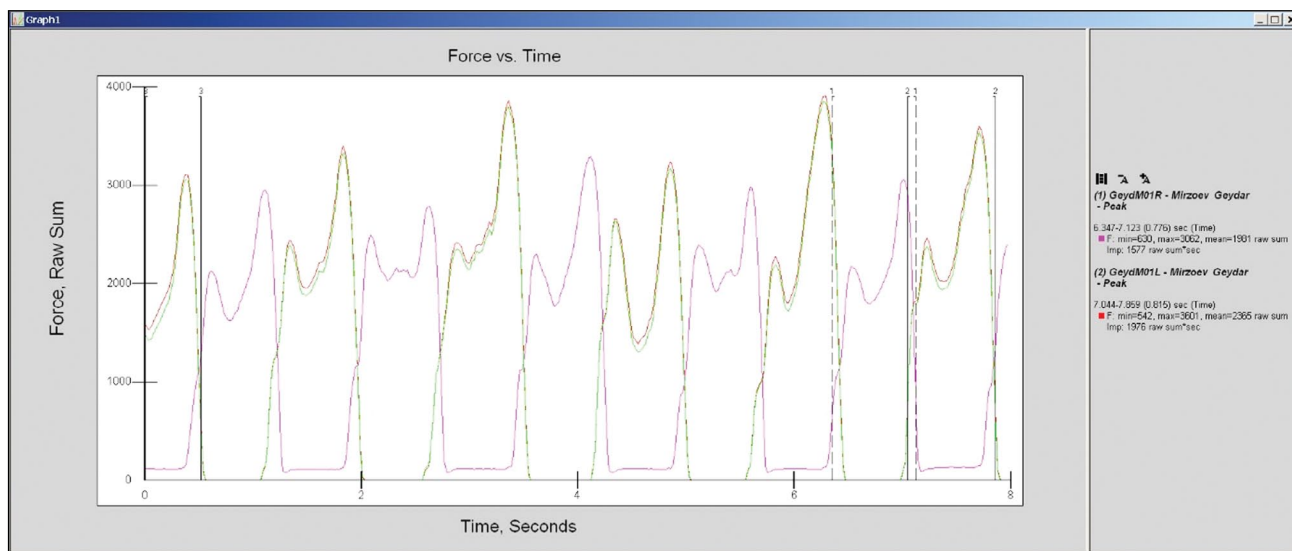


Рис. 12. Графики зависимости момента центра давления от времени при ходьбе пациента М. по ровной поверхности.

Fig. 12. Graphs of the center of pressure moment as a function of time during walking of patient M. on a flat surface.

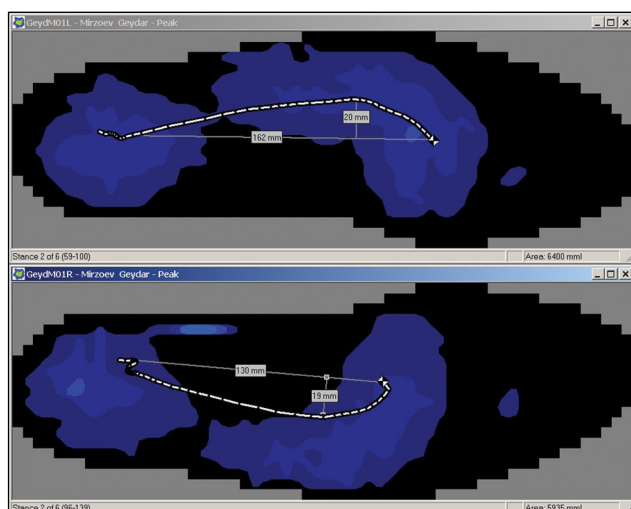


Рис. 13. Траектория центра давления при ходьбе пациента М. по ровной поверхности.

Fig. 13. Center of pressure trajectory during walking of patient M. on a flat surface.

толчок — межтолчковое расстояние (L1, мм), вторая (L2, мм) перпендикулярна к первой и расположена в точке максимального расстояния от дуги траектории ОЦД, отражающая максимальное отклонение ОЦД при перекате стопы.

В табл. 1 представлены цифровые данные биомеханических параметров ходьбы по ровной поверхности.

Таблица 1. Основные показатели ходьбы пациента М. по ровной поверхности

Table 1. The main indicators of patient M. walking on a flat floor

Сторона	Период опоры, с	Среднее давление, УЕД	L1, мм	L2, мм
Правая	0,776	1981	130	19
Левая	0,815	2365	162	20

## ОБСУЖДЕНИЕ

Оценка результатов лечения пациентов, принявших участие в исследовании, проводилась в интервале 12 и 24 мес. после операции. Средний период наблюдения составил  $22,3 \pm 9,42$  мес.

Средний показатель визуально-аналоговой шкалы до операции составил  $6,5 \pm 3,63$ , после операции —  $1,6 \pm 0,81$ , отмечено значительное снижение болевого синдрома ( $p < 0,05$ ).

Средний показатель AOFAS заднего отдела стопы до операции составил  $38 \pm 23,31$ , после операции —  $88 \pm 10,55$ , также отмечено улучшение показателей опросника ( $p < 0,05$ ).

Учитывая совокупность клинических результатов лечения пациентов, выделяли четыре вида исходов: отличный, хороший, удовлетворительный и неудовлетворительный.

Субъективная оценка результатов лечения: 56 пациентов (54,9%) — отличный результат, 30 пациентов (29,4%) — хороший, 14 пациентов (13,7%) — удовлетворительный, и 2 пациента (1,9%) оценили результат лечения как неудовлетворительный.

Поскольку во всех случаях имел место асимметричный тип ходьбы (хромота), для оценки степени асимметрии использовали специфический показатель — параметр асимметрии (ПА), который рассчитывали

как отношение периодов опоры (ПО) повреждённой и здоровой конечности:

$$ПА = \left( 1 - \frac{ПО \text{ меньший}}{ПО \text{ больший}} \right) \times 100. \quad (1)$$

За норму принят параметр асимметрии, не превышающий 5%. При значениях показателя от 5 до 10% состояние расценивается как скрытая хромота, определяемая с помощью биомеханической аппаратуры, свыше 10% — как очевидная хромота [15]. При анализе нарушений ходьбы учитывали степень асимметрии повреждённой конечности по сравнению со здоровой.

Подставив в формулу (1) данные табл. 1, получили значение ПА, равное 4,79%.

При одностороннем поражении стоп нарушается распределение опорной функции, хромота сопровождается перераспределением нагрузки на более опорную конечность. Для оценки этих процессов определяли показатель опорности (ПО) по формуле:

$$ПО = \left( 1 - \frac{СД \text{ меньший}}{СД \text{ больший}} \right) \times 100, \quad (2)$$

где СД — среднее давление.

Подставив в формулу (2) данные табл. 1, получили показатель опорности, равный 16,24%. Данный показатель свидетельствует о снижении опорной функции справа на 16,24%.

Состояние рессорной функции в значительной степени отражается в качестве переката стопы. Для оценки характеристик переката стопы рассчитывали показатели переката — продольный (ПП1) и поперечный (ПП2) — по формулам:

$$ПП1 = \left( 1 - \frac{L1 \text{ меньший}}{L1 \text{ больший}} \right) \times 100, \quad (3)$$

$$ПП2 = \left( 1 - \frac{L2 \text{ меньший}}{L2 \text{ больший}} \right) \times 100. \quad (4)$$

Для данного наблюдения показатели переката составили: ПП1 — 19,75%, ПП2 — 5%, что свидетельствует об уменьшении длины переката (межтолкающего расстояния) на 19,75% и уплощении дуги переката на 5%.

Ходьба является автоматизированным двигательным навыком, осуществляемым на подсознательном уровне. После травм и последующего оперативного лечения двигательный навык — ходьба — претерпевает перестройку различной степени выраженности. В ряде

случаев пациенты вынуждены осваивать навык заново, формировать адаптивный двигательный навык. Качество жизни пациентов при этом зависит от того, насколько новый двигательный навык адекватен и стоек. Приведённые выше рассчитываемые параметры и показатели характеризуют адекватность навыка. Для характеристики стойкости адаптации навыка в разрабатываемой биомеханической модели предусмотрели тестирование при ходьбе на тредмиле.

Ходьба по беговой дорожке характеризуется необходимостью идти по движущейся ленте в навязанном темпе и в определённой мере представляет стресс для человека. Нарушается сенсорная функция стопы (восприятие поверхности), извращается анализ ситуации зрительным анализатором (ходьба / бег на месте), отмечается отсутствие устойчивой опоры, наличие определённого чувства страха перед механизмом, дополнительный шум от тредмила и т.п. Для ходьбы на тредмиле здоровому человеку необходимо адаптировать автоматизированный навык ходьбы. В большей степени это касается пациентов с патологией стоп.

На рис. 14 представлены графики зависимости момента центра давления от времени, а на рис. 15 — траектория центра давления при ходьбе на тредмиле. В табл. 2 представлены цифровые данные.

Биомеханические параметры и показатели составили: ПА — 2,01%, ПО — 22,00%, ПП1 — 66,44%, ПП2 — 65,38%.

При исследовании ходьбы на тредмиле пациент привлекал дополнительный контроль за реализацией адаптивного двигательного навыка. Основные изменения биомеханических параметров затронули опорную функцию — показатель опорности (дефицит) увеличился с 16,24 до 22,00%, а также структуру переката стопы — дефицит межтолкающего расстояния увеличился с 19,75 до 66,44%, а поперечный размер, наоборот, превысил показатель левой стопы на 65,38% при дефиците 5% при ходьбе по ровной поверхности. Анализ траектории общего центра давления свидетельствует о практическом отсутствии переката правой стопы, но замещении рессорной функции балансировочной.

На наш взгляд, усложнение условий для ходьбы привело к срыву адаптивного двигательного навыка, что свидетельствует о его низкой стойкости. Наиболее уязвимой оказалась рессорная функция, а именно структура переката стопы. Для характеристики стойкости адаптивного навыка определяли коэффициент адаптивности

Таблица 2. Основные показатели ходьбы пациента М. на тредмиле

Table 2. The main indicators of patient M. walking on a treadmill

Сторона	Период опоры, с	Среднее давление, УЕД	L1, мм	L2, мм
Правая	0,995	1687	50	26
Левая	0,975	2163	149	9

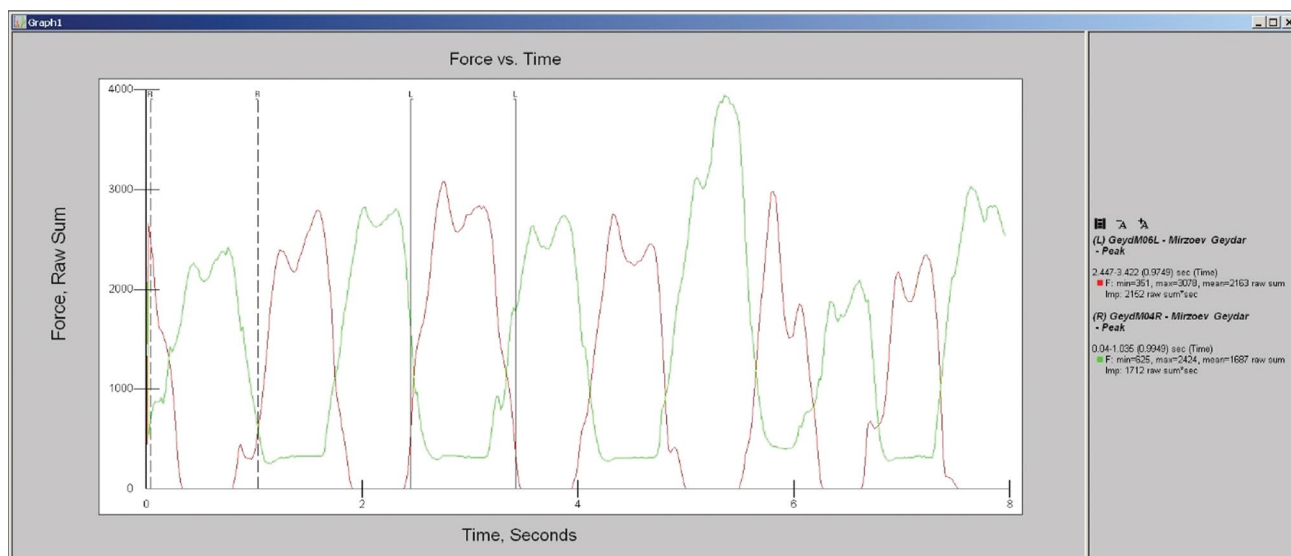


Рис. 14. Графики зависимости момента центра давления от времени при ходьбе пациента М. на тредмиле.

Fig. 14. Graphs of the center of pressure moment as a function of time during treadmill walking of patient M.

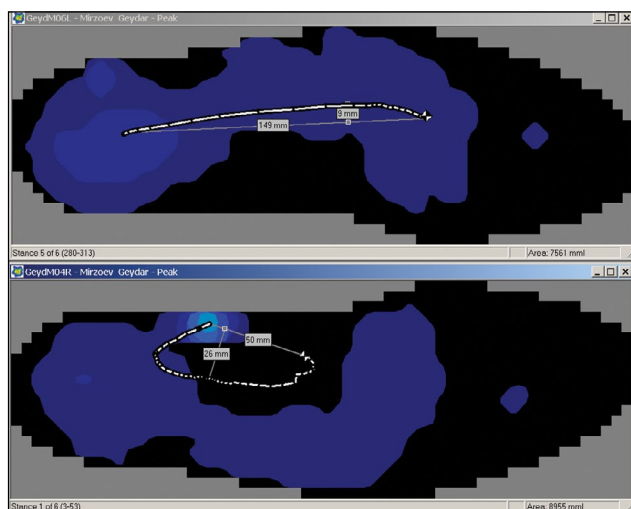


Рис. 15. Траектория центра давления при ходьбе пациента М. на тредмиле.

Fig. 15. Center of pressure trajectory during treadmill walking of patient M.

(КА), представляющий отношение межтопочковой длины при ходьбе по ровной поверхности (пол) к межтопочковой длине при ходьбе на тредмиле по формуле:

$$КА = \frac{ПП1 \text{ пол}}{ПП1 \text{ тредмил}} \quad (5)$$

В представленном наблюдении КА составил 0,3. При повышении стойкости адаптивного навыка этот коэффициент стремится к 1.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная клиническая модель биомеханической оценки параметров ходьбы позволяет получить объективные данные о структуре цикла шага

при одностороннем поражении стоп и оценить адекватность адаптивного двигательного навыка у больных до и после оперативного лечения и в отдалённом периоде наблюдений. Основными параметрами и показателями оценки структуры и адекватности адаптивного двигательного навыка являются данные, полученные при тестировании ходьбы по ровной поверхности, а именно параметр асимметрии, показатель опорности, показатели переката — продольный и поперечный. Для оценки стойкости адаптивного двигательного навыка проводится тестирование ходьбы на беговой дорожке и расчёт коэффициента адаптивности.

## ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

**Вклад авторов.** Все авторы одобрили финальную версию перед публикацией, а также согласились нести ответственность за все аспекты работы, гарантируя надлежащее рассмотрение и решение вопросов, связанных с точностью и добросовестностью любой её части.

**Этическая экспертиза.** По результатам рассмотрения документов Комитет по этике при ФГБУ «НМИЦ ТО им. Н.Н. Приорова» Минздрава России (протокол № 24/21 от 26 декабря 2021 года) принял решение об отсутствии нарушений норм биомедицинской этики при выполнении исследования и одобряет проведение данного клинического испытания.

**Согласие на публикацию.** Все пациенты подписали информированное согласие на лечение, включение в исследование и опубликование медицинских данных в научных целях. Детализирующая информация, способствующая персонификации включённых в исследование пациентов, отсутствует.

**Источники финансирования.** Отсутствуют.

**Раскрытие интересов.** Авторы заявляют об отсутствии отношений, деятельности и интересов (личных, профессиональных или финансовых), связанных с третьими лицами (коммерческими, некоммерческими, частными), интересы которых могут быть затронуты содержанием

статьи, а также иных отношений, деятельности и интересов за последние три года, о которых необходимо сообщить.

**Оригинальность.** При создании настоящей работы авторы не использовали ранее опубликованные сведения (текст, данные).

**Доступ к данным.** Все данные, полученные в настоящем исследовании, доступны в статье.

**Генеративный искусственный интеллект.** При создании настоящей статьи технологии генеративного искусственного интеллекта не использовались.

**Рассмотрение и рецензирование.** Настоящая работа подана в журнал в инициативном порядке и рассмотрена по обычной процедуре. В рецензировании участвовали два внешних рецензента, член редакционной коллегии и научный редактор издания.

## ADDITIONAL INFO

**Author contributions:** All the authors approved the version of the manuscript to be published and agreed to be accountable for all aspects of the work, ensuring that questions related to the accuracy or integrity of any part of the work are appropriately investigated and resolved.

**Ethics approval:** Based on the review of the submitted documents, the Ethics Committee of the Priorov National Medical Research Center of Traumatology

and Orthopedics, Ministry of Health of Russia (Minutes No. 24/21, dated December 26, 2021), concluded that there were no violations of biomedical ethics in the conduct of the study and approved this clinical trial.

**Consent for publication:** Informed consent was obtained from all patients for treatment, participation in the study, and publication of medical data for scientific purposes. No detailed information that could result in patient identification is included.

**Funding sources:** No funding.

**Disclosure of interests:** The authors have no relationships, activities, or interests for the last three years related to for-profit or not-for-profit third parties whose interests may be affected by the content of the article, or other relationships, activities, or interests for the last three years to report of.

**Statement of originality:** No previously obtained or published material (text or data) was used in this study or article.

**Data availability statement:** All data obtained in this study are available in this article.

**Generative AI:** No generative artificial intelligence technologies were used to prepare this article.

**Provenance and peer review:** This paper was submitted unsolicited and reviewed following the standard procedure. The peer review process involved two external reviewers, a member of the Editorial Board, and the in-house scientific editor.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ | REFERENCES

- Bernstein M, Reidler J, Fragomen A, Rozbruch SR. Ankle Distraction Arthroplasty: Indications, Technique, and Outcomes. *J Am Acad Orthop Surg.* 2017;25(2):89–99. doi: 10.5435/JAAOS-D-14-00077
- Agel J, Coetzee JC, Sangeorzan BJ, Roberts MM. Functional limitations of patients with end-stage ankle arthrosis. *Foot Ankle Int.* 2005;26(7):537–539. doi: 10.1177/107110070502600707
- Weinraub GM, Vijayakumar A. Arthroscopy for Traumatic Ankle Injuries. *Clin Podiatr Med Surg.* 2023;40(3):529–537. doi: 10.1016/J.CPM.2022.12.003
- Zhao HM, Liang XJ, Li Y, Ning N, Lu J. Supramalleolar Osteotomy With Distraction Arthroplasty in Treatment of Varus Ankle Osteoarthritis With Large Talar Tilt Angle: A Case Report and Literature Review. *J Foot Ankle Surg.* 2017;56(5):1125–1128. doi: 10.1053/J.JFAS.2017.04.022
- Aziz H, Amirian A, Dabash S, Dunn WR, Bloome D. Ankle Arthroscopy as an Adjunct to the Management of Ankle Fractures. *Foot ankle Orthop.* 2021;6(2):24730114211002165. doi: 10.1177/24730114211002165
- Zhao H, Liang X, Li Y, et al. The role of fibular for supramalleolar osteotomy in treatment of varus ankle arthritis: a biomechanical and clinical study. *J Orthop Surg Res.* 2016;11(1):127. doi: 10.1186/S13018-016-0462-2
- Rammelt S, Grass R, Zawadzki T, Biewener A, Zwipp H. Foot function after subtalar distraction bone-block arthrodesis. A Prospective study. *J Bone Joint Surg Br.* 2004;86(5):659–68. doi: 10.1302/0301-620X.86B5
- Smirnova LM, Arzhannikova EE, Karapetyan SV, Gayevskaya OE. The method of using the complexes of the "Scan" series in the diagnosis of foot condition and the appointment of orthopedic insoles: method. stipend. Federal State Budgetary Institution Spb NCEPR named after G.A. Albrecht of

the Ministry of Labor of Russia. St. Petersburg: TSIATSAN LLC; 2015. 75 p. (In Russ.) EDN: VYLPZN

9. Vitenzon AS, Petrushanskaya KA, Spivak BG, et al. Features of the biomechanical structure of walking in healthy children of different ages. *Russian journal of biomechanics.* 2013;17(1):78–93. (In Russ.) EDN: PYHDPZ

10. Kosov IS, Merkulov VN, Imyarov SD, Mikhailova SA. Clinical Analysis of Gait and Assessment of Surgical Treatment Outcomes in Children with Neurogenic Feet Deformity. *N.N. Priorov Journal of Traumatology and Orthopedics.* 2014;(3):45–51. doi: 10.32414/0869-8678-2014-3-45-51 EDN: QWZNIE

11. Burkov DV, Grigoricheva LG, Murylev VY, et al. Total ankle replacement with additional procedures (review). *Dep Traumatol Orthop.* 2018;(4):16–23. doi: 10.17238/issn2226-2016.2018.4.16-23 EDN: ZCHGRV

12. Hunt KJ, Pereira H, Kelley J, et al. The Role of Calcaneofibular Ligament Injury in Ankle Instability: Implications for Surgical Management. *Am J Sports Med.* 2019;47(2):431–437. doi: 10.1177/0363546518815160

13. Valderrabano V, Miska M, Leumann A, Wiewiorski M. Reconstruction of osteochondral lesions of the talus with autologous spongiosa grafts and autologous matrix-induced chondrogenesis. *Am J Sports Med.* 2013;41(3):519–527. doi: 10.1177/0363546513476671

14. Acevedo JI, Mangone P. Ankle instability and arthroscopic lateral ligament repair. *Foot Ankle Clin.* 2015;20(1):59–69. doi: 10.1016/J.FCL.2014.10.002

15. Skvortsov DV. Diagnosis of motor pathology by instrumental methods: gait analysis, stabilometry. Moscow: Nauch.-med. MBN company; 2007. 617 p. (In Russ.) EDN: QLQAIN

## ОБ АВТОРАХ

\* Орлецкий Анатолий Корнеевич, д-р мед. наук, профессор; адрес: Россия, 127299, Москва, ул. Приорова, д. 10; ORCID: 0009-0000-1461-4802; e-mail: nova495@mail.ru

## AUTHORS INFO

\* Anatoliy K. Orletskiy, MD, Dr. Sci. (Medicine), Professor; address 10 Priorova st, Moscow, Russia, 127299; ORCID: 0009-0000-1461-4802; e-mail: nova495@mail.ru

\* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

**Косов Игорь Семёнович**, д-р мед. наук;

ORCID: 0009-0008-7053-7213;

eLibrary SPIN: 3260-8950;

e-mail: kozeti@mail.ru

**Шкуро Константин Викторович**;

ORCID: 0009-0004-8259-7994;

eLibrary SPIN: 3442-1306;

e-mail: shkuro\_kostya@mail.ru

**Тимченко Дмитрий Олегович**, канд. мед. наук;

ORCID: 0009-0009-6859-2528;

eLibrary SPIN: 6626-2823;

e-mail: d.o.timchenko@mail.ru

**Васильев Дмитрий Олегович**, канд. мед. наук;

ORCID: 0000-0002-6573-3243;

eLibrary SPIN: 8980-0432;

e-mail: A-tendo@mail.ru

**Гордеев Николай Александрович**;

ORCID: 0009-0002-4251-8070;

eLibrary SPIN: 5687-9521;

e-mail: nova495@mail.ru

**Жариков Владислав Алексеевич**;

ORCID: 0009-0000-9310-1318;

eLibrary SPIN: 5347-6881;

e-mail: vladislav.zharikov1996@yandex.ru

**Igor S. Kosov**, MD, Dr. Sci. (Medicine);

ORCID: 0009-0008-7053-7213;

eLibrary SPIN: 3260-8950;

e-mail: kozeti@mail.ru

**Konstantin V. Shkuro**;

ORCID: 0009-0004-8259-7994;

eLibrary SPIN: 3442-1306;

e-mail: shkuro\_kostya@mail.ru

**Dmitriy O. Timchenko**, MD, Cand. Sci. (Medicine);

ORCID: 0009-0009-6859-2528;

eLibrary SPIN: 6626-2823;

e-mail: d.o.timchenko@mail.ru

**Dmitriy O. Vasilyev**, MD, Cand. Sci. (Medicine);

ORCID: 0000-0002-6573-3243;

eLibrary SPIN: 8980-0432;

e-mail: A-tendo@mail.ru

**Nicolay A. Gordeev**;

ORCID: 0009-0002-4251-8070;

eLibrary SPIN: 5687-9521;

e-mail: nova495@mail.ru

**Vladislav A. Jarikov**;

ORCID: 0009-0000-9310-1318;

eLibrary SPIN: 5347-6881;

e-mail: vladislav.zharikov1996@yandex.ru