

DOI: <https://doi.org/10.36425/rehab634515>

Характеристика функции ходьбы у больных с гемипарезом в раннем восстановительном периоде ишемического инсульта: одноцентровое ретроспективное исследование

Д.В. Скворцов^{1, 2, 3}, Н.В. Гребенкина², С.Н. Кауркин^{1, 2}, Г.Е. Иванова^{1, 2}¹ Федеральный центр мозга и нейротехнологий, Москва, Россия;² Российский национальный исследовательский медицинский университет имени Н.И. Пирогова, Москва, Россия;³ Федеральный научно-клинический центр специализированных видов медицинской помощи и медицинских технологий, Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Обоснование. Нарушение походки, наблюдаемое у 80% пациентов, перенёсших инсульт, приводит к повышенному риску падений, снижению функциональной независимости и, как следствие, влияет на качество жизни.

Цель исследования — изучить функциональную картину гемипареза в раннем восстановительном периоде инсульта.

Материалы и методы. Проведено наблюдательное ретроспективное одномоментное одноцентровое исследование, включавшее анализ первичных биомеханических параметров ходьбы у 31 пациента и 34 человек контрольной группы. Регистрировались пространственные, временные, кинематические и электромиографические характеристики. Проведены статистическая оценка, а также межгрупповое и внутригрупповое сравнение полученных параметров для определения патогномичных особенностей походки при гемиплегии в раннем восстановительном периоде инсульта.

Результаты. Выявлены изменения биомеханики ходьбы, типичные для пациентов с гемипарезом, перенёсших инсульт: лёгкая асимметрия цикла шага, нормальная продолжительность периода опоры на паретичной стороне, значительное увеличение продолжительности периода опоры на здоровой стороне, а также укорочение периода одиночной опоры на паретичной стороне. Кроме того, асимметрия функции ходьбы характеризовалась изменением реципрокности, т.е. гармоничной последовательности циклов шага, снижением и изменением функции тазобедренного и коленного сустава, увеличением амплитуды голеностопного сустава, снижением и изменением профиля биоэлектрической активности мышц, при этом менее всего страдала функция четырехглавой мышцы бедра (*musculus quadriceps femoris*).

Заключение. Основные изменения функции ходьбы характеризуются асимметрией пространственно-временных характеристик, снижением амплитуды движений в тазобедренном и коленном суставах паретичной стороны, увеличением амплитуды в голеностопном суставе, снижением биоэлектрической активности мышц и смещением фаз их активности. Полученные результаты могут способствовать лучшему пониманию механизмов гемиплегической походки и стать инструментом для разработки более персонализированного, целенаправленного плана реабилитации пациентов с гемипарезом в раннем восстановительном периоде ишемического инсульта.

Ключевые слова: ишемический инсульт; парез; анализ ходьбы; биомеханика; электромиография.

Как цитировать:

Скворцов Д.В., Гребенкина Н.В., Кауркин С.Н., Иванова Г.Е. Характеристика функции ходьбы у больных с гемипарезом в раннем восстановительном периоде ишемического инсульта: одноцентровое ретроспективное исследование // Физическая и реабилитационная медицина, медицинская реабилитация. 2024. Т. 6, № 3. С. 208–219. DOI: <https://doi.org/10.36425/rehab634515>

DOI: <https://doi.org/10.36425/rehab634515>

Characteristics of gait function in hemiparetic patients with subacute period of ischemic stroke: a single-center retrospective study

Dmitry V. Skvortsov^{1, 2, 3}, Natalya V. Grebenkina², Sergey N. Kaurkin^{1, 2}, Galina E. Ivanova^{1, 2}¹ Federal Center of Brain Research and Neurotechnologies, Moscow, Russia;² The Russian National Research Medical University named after N.I. Pirogov, Moscow, Russia;³ Federal Medico-Biological Agency Federal Research Clinical Center, Moscow, Russia

ABSTRACT

BACKGROUND: Gait disorders are common among 80% of stroke patients. Its consequences include increased risk of falls and functional limitations, which can significantly reduce the quality of life.

AIM: To investigate the functional profile of hemiparesis resulting from subacute ischemic stroke.

MATERIALS AND METHODS: This observational, retrospective, one-stage, single-center study analyzed primary biomechanical gait parameters in 31 patients and 34 healthy controls. Spatial, temporal, kinematic, and electromyographic characteristics were recorded. A statistical assessment and inter-group and intra-group comparison of the collected data were performed to identify the pathognomonic features of hemiplegic gait in patients with subacute stroke.

RESULTS: Changes in gait biomechanics typical for hemiparetic patients who have suffered from ischemic stroke were described: slight asymmetry of step cycle, normal duration of support period on the paretic side, significant increase in duration of support period on the healthy side, and shortening of single support period on the paretic side. Additionally, the asymmetry of the walking function was characterized by changes in reciprocity, that is, a harmonious sequence of step cycles. The function of the hip and knee joints was reduced and altered, and the amplitude of the ankle joint was increased. Decrease and change in the bioelectric activity profile of muscles were detected. Moreover, the quadriceps femoris function was least affected.

CONCLUSION: The main changes in walking function are characterized by an asymmetry of spatiotemporal parameters, a decrease in movement amplitudes of the hip and knee joints on the paretic side, an increase in ankle joint amplitude, a decrease in the bioelectric activity of muscles, and a shift in the phases of their activity. The results contribute to a better understanding of the mechanisms behind hemiplegic gait and provide a valuable tool for developing more personalized and targeted rehabilitation plans for patients suffering from hemiparesis as a result of subacute ischemic stroke.

Keywords: ischemic stroke; paresis; gait analysis; biomechanics; electromyography.

To cite this article:

Skvortsov DV, Grebenkina NV, Kaurkin SN, Ivanova GE. Characteristics of gait function in hemiparetic patients with subacute period of ischemic stroke: a single-center retrospective study. *Physical and rehabilitation medicine, medical rehabilitation*. 2024;6(3):208–219. DOI: <https://doi.org/10.36425/rehab634515>

Список сокращений

Пространственно-временные параметры:

ПО — период опоры

ПОО — период одиночной опоры

ПДО — период двойной опоры

НВДО — начало второй двойной опоры

ЦШ — цикл шага

Кинематические параметры:

Га0 — начальная амплитуда голеностопного сустава

Га1 и Гх1 — амплитуда и фаза первого разгибания голеностопного сустава

Га2 и Гх2 — амплитуда и фаза первого сгибания голеностопного сустава

Га3 и Гх3 — амплитуда и фаза второго разгибания голеностопного сустава

Га4 и Гх4 — амплитуда и фаза второго сгибания голеностопного сустава

Ка1 и Кх1 — амплитуда и фаза первого сгибания коленного сустава

Ка2 и Кх2 — амплитуда и фаза первого разгибания коленного сустава

Ка3 и Кх3 — амплитуда и фаза второго сгибания коленного сустава

Та1 и Тх1 — амплитуда и фаза сгибания тазобедренного сустава в начале ходьбы

Та2 и Тх2 — полное разгибание тазобедренного сустава в период переноса

Та3 и Тх3 — сгибание тазобедренного сустава в период переноса

ОБОСНОВАНИЕ

Инсульт относится к наиболее распространённым неврологическим заболеваниям среди взрослого населения, оставаясь одной из ведущих причин смертности и инвалидности во всём мире. По данным Всемирной организации здравоохранения, инсульт ежегодно диагностируется приблизительно у 15 млн человек по всему миру, из них 1/3 остаётся инвалидами на всю жизнь. При этом 87% всех случаев инсульта приходится на ишемическую форму [1], из них 11% — это лица в возрасте от 15 до 49 лет [2]. В России инсульт поражает приблизительно 500 000 человек ежегодно [3]. По данным Росстата, смертность от острого нарушения мозгового кровообращения в 2021 году составила чуть более 130 000 человек.

Функциональные нарушения, развивающиеся у пациентов, перенёвших инсульт, негативно влияют на качество жизни и требуют длительной реабилитации для частичного или полного восстановления нарушенных функций. Инсульт как причина мышечной слабости и гемипареза оказывает серьёзное влияние на ряд двигательных навыков, в частности верхних и нижних конечностей, что наблюдается в 88% случаев [4]. Так, у 80% пациентов гемипарез является причиной нарушения функции ходьбы [5], что вызывает трудности при выполнении повседневных действий, а также повышает риск падений на всех этапах после перенесённого нарушения мозгового кровообращения [6, 7]. Нарушения походки у пациентов после инсульта обусловлены в основном сенсомоторной дисфункцией, включая мышечную слабость и дефицит проприоцепции.

Для оценки последствий инсульта, включая нарушение походки, в настоящее время врачами-клиницистами используются различные стандартизированные шкалы. Для количественной оценки функции ходьбы применяют шестибалльную шкалу оценки мышечной силы,

модифицированную шкалу Эшворта (modified Ashworth scale of muscle spasticity, mAS), тест 6-минутной ходьбы (6-minute walk test, 6MWT). В стандарт оценки локомоторной функции также входят индекс мобильности Ривермид (Rivermead mobility index, RMI), динамический индекс походки (dynamic gait index, DGI), индекс ходьбы Хаузера (Hauser ambulation index, HAI), шкала функциональной независимости, пункт «Подвижность» (functional independence measure, FIM).

К инструментальным методам оценки относится биомеханическое исследование ходьбы, включающее регистрацию пространственно-временных и кинематических параметров ходьбы, а также биоэлектрического профиля мышц нижних конечностей пациента. К классическим биомеханическим изменениям походки пациентов, перенёвших инсульт, относятся увеличение времени цикла шага, укорочение длины шага, удлинение периода переноса и укорочение периода опоры на стороне пареза, а также увеличение периода опоры и уменьшение периода переноса на здоровой стороне [8, 9]. Со стороны кинематики для гемиплегической походки характерно уменьшение амплитуды движений как на поражённой, так и на здоровой стороне [10]. По данным электромиографии отмечают снижение амплитуды биоэлектрической активности мышц или её отсутствие, а также сдвиг пиков активности относительно их типичного положения [11].

Обусловленные инсультом изменения ходьбы полиморфны и характеризуются сложными неоднородными движениями, что затрудняет диагностику и дальнейшую реабилитацию двигательной активности пациентов.

Цель исследования — изучить функциональную картину гемипареза в раннем восстановительном периоде ишемического инсульта, основываясь на результатах биомеханического исследования ходьбы у данной категории пациентов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Дизайн исследования

Обсервационное ретроспективное одномоментное одноцентровое.

Для отбора пациентов в исследование из базы данных ФГБУ «Федеральный центр мозга и нейротехнологий» Федерального медико-биологического агентства (ФГБУ ФЦМН ФМБА России, Москва) извлечены и проанализированы 170 первичных биомеханических исследований ходьбы (рис. 1).

Критерии соответствия

Критерии включения: пациенты с впервые возникшим ишемическим инсультом в раннем восстановительном периоде (<180 дней) в возрасте от 18 до 75 лет, у которых наблюдались стойкие двигательные нарушения в виде гемипареза без сопутствующей двигательной патологии.

Критерии исключения: поздний период ишемического инсульта (>180 дней); геморрагический инсульт; повторный инсульт; сопутствующая двигательная патология; возраст старше 75 лет; лёгкая форма гемипареза, не оказывающая существенного влияния на функцию ходьбы;

биомеханические параметры, близкие к норме; дефекты регистрации биомеханического исследования.

Условия проведения

Исследование проведено в лаборатории Научно-исследовательского центра медицинской реабилитации ФГБУ «Федеральный центр мозга и нейротехнологий» Федерального медико-биологического агентства (ФГБУ ФЦМН ФМБА России, Москва) в период с января 2021 по январь 2024 года.

Регистрация протокола: ClinicalTrials.gov: NCT06299943.

Исходы исследования

Основной исход исследования: получены биомеханические параметры ходьбы пациентов с гемипарезом в результате церебрального инсульта в раннем восстановительном периоде.

Дополнительные исходы исследования: обнаружены ранее не описанные варианты функции суставов и мышц на стороне пареза.

Методы регистрации исходов

Клинические методы оценки: возраст; длина тела; масса тела; индекс массы тела; оценка силы мышц с помощью мануального мышечного тестирования; клинические

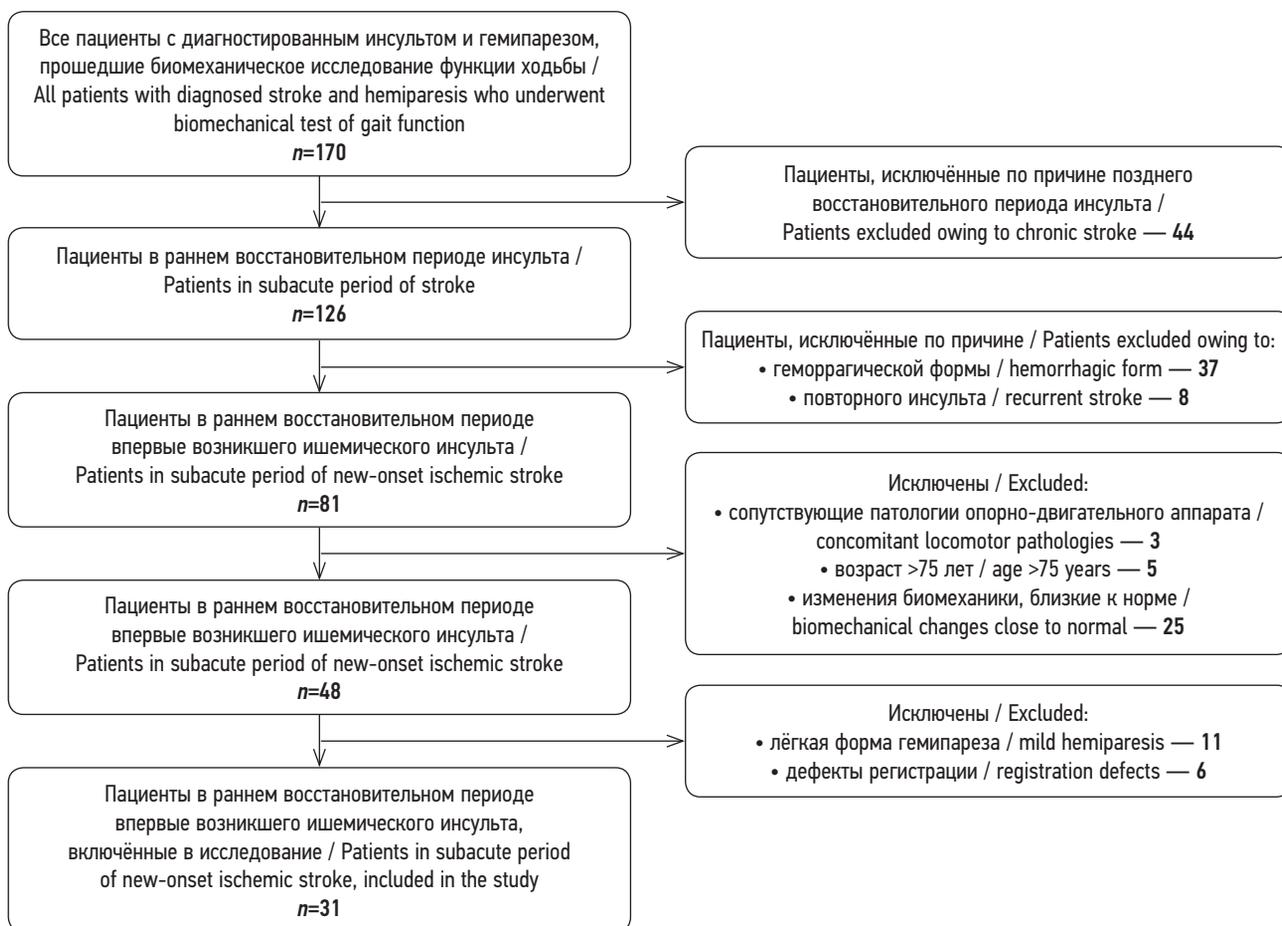


Рис. 1. Блок-схема отбора пациентов в исследование.

Fig. 1. Block diagram of the patients' selection for the study.

шкалы, включая модифицированную шкалу Эшворта, индекс динамической походки, тест «Встань и иди».

Методика оценки функции ходьбы. Для проведения биомеханического исследования ходьбы использовалось 7 сенсоров комплекса «Стэдис» (Нейрософт, Иваново), которые фиксировались эластичными манжетами на крестце, боковой поверхности средней трети бёдер, в области наружных лодыжек голеностопных суставов и на тыле стопы. Пациент ходил в произвольном темпе по дорожке длиной 10 м с разворотами в начале и в конце дистанции до получения 30–40 циклов шага для каждой ноги. При этом автоматический алгоритм отбрасывал шаги в начале и при завершении ходьбы, при торможении и ускорении, а также любые другие неустойчивые шаги (потеря равновесия, спотыкания). В результате регистрации получали стандартный отчёт, содержащий пространственно-временные параметры цикла шага для каждой ноги, гониограммы движений (сгибание и разгибание) для тазобедренного, коленного и голеностопного суставов, а также профили электрической активности 4 мышц: четырёхглавой мышцы бедра (*musculus quadriceps femoris*), подколенного сухожилия (*hamstring*), передней большеберцовой мышцы (*musculus tibialis anterior*) и трёхглавой мышцы голени (*musculus triceps surae*).

В ходе исследования оценивались пространственно-временные параметры: цикл шага (ЦШ, сек), период опоры (ПО, %), период одиночной опоры (ПОО, %), период двойной опоры (ПДО, %), начало второй двойной опоры (НВДО, %), клиренс (см), циркумдукция (см) и скорость ходьбы (км/ч).

Одновременно регистрировались кинематические параметры суставов нижних конечностей: амплитуды сгибания и разгибания, оценка которых проводилась при помощи гониограмм, автоматически генерируемых программным обеспечением для каждого сустава. Гониограммы рассчитывались на основе зарегистрированных ЦШ и использовались для оценки амплитуд, измеренных в градусах, и соответствующих фаз, измеренных в процентах от ЦШ (рис. 2). Тазобедренный сустав оценивался по амплитуде и фазе сгибания в начале ходьбы (Та1 и Тх1

соответственно), полного разгибания (Га2 и Тх2) и сгибания в период переноса (Та3 и Тх3). Параметры коленного сустава включали амплитуду и фазу первого сгибания (Ка1 и Кх1), первого разгибания (Ка2 и Кх2) и второго сгибания (Ка3 и Кх3). Голеностопный сустав оценивался по начальной амплитуде Га0, а также по амплитуде и фазе первого разгибания (Га1 и Гх1), первого сгибания (Га2 и Гх2), второго разгибания (Га3 и Гх3) и второго сгибания (Га4 и Гх4).

Для оценки профилей биоэлектрической активности мышц определяли максимальную амплитуду в милливольтгах (мВ) и её фазу. *Tibialis anterior* имела два пика биоэлектрической активности (TibA1 и TibA2) и соответствующие значения фаз (TibX1 и TibX2). Профиль *triceps surae* представлен одним пиком активности (TriA) и одной фазой (TriX). *Quadriceps femoris* представлена двумя пиками (QA1 и QX2) и соответствующими значениями фаз (QX1 и QX2). *Hamstring* имела один пик (HmA) и одну фазу (HmX).

Этическая экспертиза

Организация исследования одобрена локальным этическим комитетом ФГБУ ФЦМН ФМБА России (ЛЭК ФЦМН ФМБА № 11/25-04-22 от 25.04.2022). Все манипуляции и медицинские услуги, проведённые и описываемые в данной статье, соответствуют этическим нормам и этическим принципам Хельсинкской декларации.

Статистический анализ

Обработку данных проводили с использованием программного обеспечения Statistica 12.0. Для проверки возможного нормального распределения количественных параметров применялся тест Шапиро–Уилка, показавший, что распределение было отличным от нормального ($p < 0,05$). Данные представлены в виде значений медиан и квартилей 25% и 75% (Me: 25%; 75%). Для внутригруппового сравнения полученных параметров использовали критерий Вилкоксона, а для межгруппового сравнения — U-критерий Манна–Уитни. Статистически значимым считали значение $p < 0,05$.

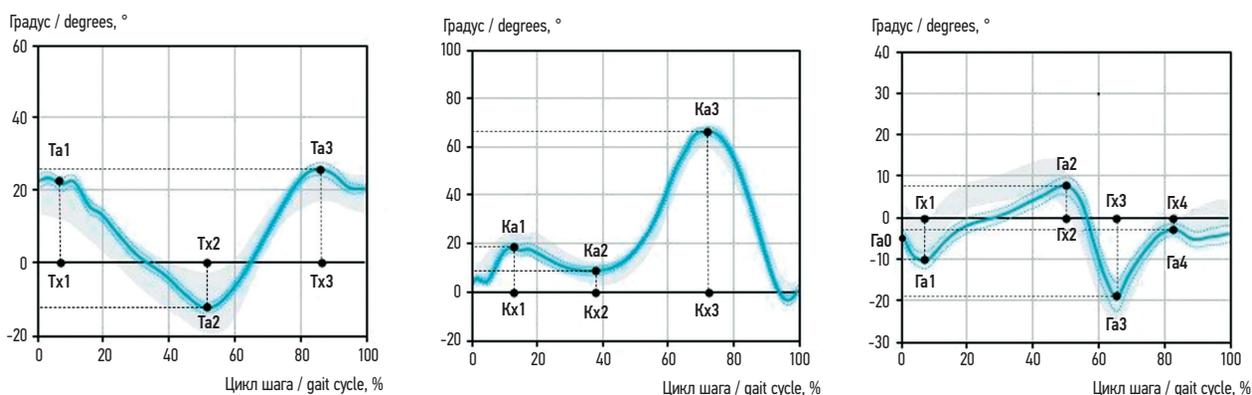


Рис. 2. Слева направо основные амплитуды и фазы цикла шага для тазобедренного, коленного и голеностопного суставов соответственно.
Fig. 2. From left to right main amplitudes and phases of the gait cycle for hip, knee, and ankle joints accordingly.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Объекты (участники) исследования

В исследовании приняли участие группа пациентов и группа контроля. Основная группа состояла из 31 пациента (23 женщины, 8 мужчин) с гемипарезом в раннем восстановительном периоде ишемического инсульта. В 45% случаев (14 человек) наблюдался правосторонний гемипарез. Средний возраст группы составил $54,8 \pm 10,1$ года, среднее время после инсульта — $79,5 \pm 42,6$ дня. Средний индекс массы тела составил $27,3 \pm 4,4$ кг/м². Средняя сила мышц нижних конечностей, измеренная с помощью мануального мышечного тестирования, составила 3,1 балла, а мышечный тонус нижних конечностей, оцененный по модифицированной шкале Эшворта, — 1–2 балла. Среднее значение индекса динамической походки составило 14,8, среднее время выполнения теста «Встань и иди» (Timed Up and Go test) — 28,3 секунды.

В группу контроля вошли 34 практически здоровых добровольца (18 женщин и 16 мужчин), средний возраст которых составил $29,8 \pm 7,9$ года, а средний индекс массы тела — $20,6 \pm 1,8$ кг/м².

Основные результаты исследования

Наблюдались следующие статистически значимые различия в пространственно-временных параметрах (рис. 3). При внутригрупповом сравнении на паретичной стороне обнаружены более короткий ПО, более раннее начало ПОО и НВДО, меньшая высота подъема стопы и более высокая циркумдукция по сравнению с теми же параметрами на здоровой стороне. При межгрупповом сравнении

выявлены более продолжительные ЦШ и ПДО, более низкая высота подъема стопы на обеих сторонах в группе пациентов по сравнению с контрольной группой. Более продолжительный ПОО, более позднее НВДО и снижение высоты подъема стопы наблюдались на здоровой стороне в группе пациентов, в то время как паретичная сторона характеризовалась более ранними ПОО и НВДО, а также увеличенной циркумдукцией. Наконец, скорость в группе пациентов была значительно ниже, чем в контрольной группе.

Наблюдались следующие статистически значимые различия в кинематических параметрах (рис. 4). При сравнении со здоровой стороной на паретичной стороне отмечалось снижение Та1 и Та3, а также снижение и задержка Та2. Коленный сустав паретичной стороны демонстрировал снижение Ка1, преждевременное появление Ка2, снижение и преждевременное появление Ка3. В голеностопном суставе паретичной стороны наблюдалось увеличение и преждевременное возникновение Га1, снижение и преждевременное возникновение Га2, преждевременное появление Га3, увеличение Га4. Кроме того, в голеностопном суставе паретичной стороны отмечено значительное уменьшение Га0, демонстрировавшее отвисание стопы, характерное для постинсультного гемипареза.

При межгрупповом сравнении обнаружены достоверные снижение и преждевременное возникновение Та1 и Та2, снижение и задержка Та3 на паретичной стороне, в то время как на здоровой стороне наблюдались снижение и преждевременное возникновение Та1, снижение и задержка Та2, задержка Та3. Коленный сустав паретичной стороны представлен снижением и ранним появлением Ка1, снижением Ка2 и Ка3, в то время как здоровая

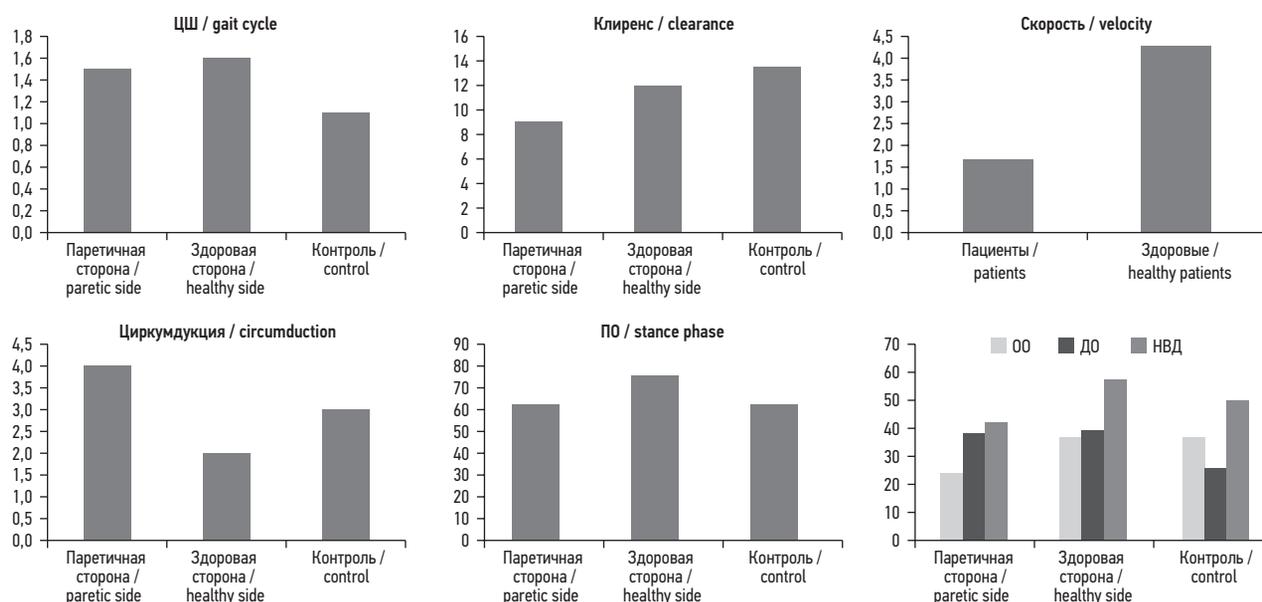


Рис. 3. Пространственно-временные параметры: ЦШ — цикл шага (%); клиренс (см); скорость (км/ч); циркумдукция (см); ПО — период опоры (%); ОО — период одиночной опоры; ДО — период двойной опоры; НВД — начало второй двойной опоры.

Fig. 3. Spatiotemporal parameters: from left to right, first row: gait cycle, clearance, velocity; from left to right, second row: circumduction, stance phase, single limb stance phase, double limb stance phase, and beginning of the terminal double limb stance phase. OO, period of single support; DO, period of double support; HVD, beginning of the second double support.

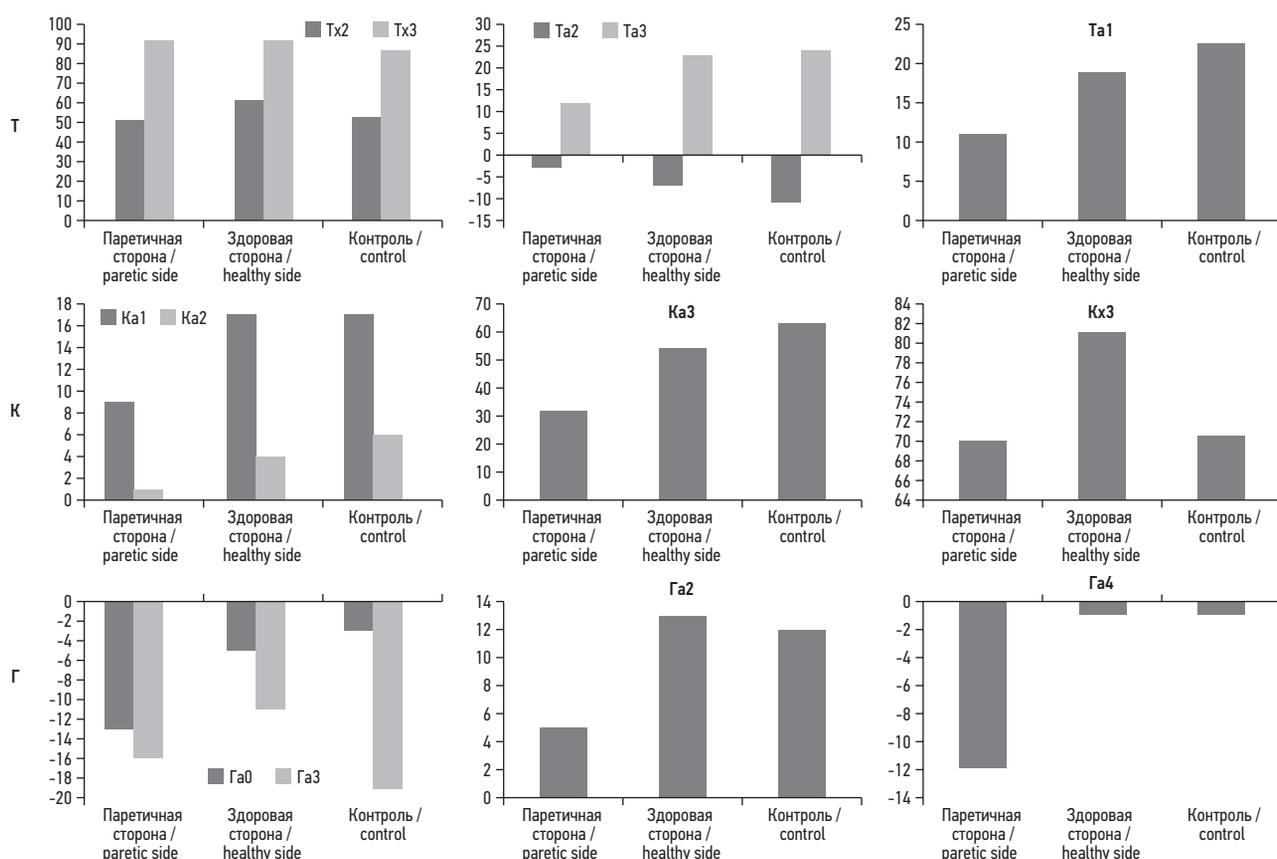


Рис. 4. Кинематические параметры. Т — тазобедренный сустав, К — коленный сустав, Г — голеностопный сустав.

Fig. 4. Kinematic parameters. T, hip joint; K, knee joint; Г, ankle joint.

сторона демонстрировала раннее возникновение Ka1, снижение и задержку Ka3. В голеностопном суставе паретичной стороны наблюдались уменьшение Ga0, увеличение и преждевременное появление Ga1, снижение Ga2, задержка Ga3 и увеличение Ga4, в то время как на здоровой стороне отмечались уменьшение Ga0, преждевременное появление Ga1, задержка Ga2, снижение и задержка Ga3 и увеличение Ga4.

При внутригрупповом сравнении наблюдались следующие статистически значимые различия в электромиографических параметрах (рис. 5). Биоэлектрическая активность мышц на паретичной стороне демонстрировала сниженный TAa1, сниженный и преждевременный TAa2, сниженный и преждевременный TriA, сниженный Qa1, преждевременный Qa2 и сниженный HmA.

При межгрупповом сравнении отмечались снижение TAa1 и снижение и задержка TAa2 на паретичной стороне, снижение и задержка TAa1 и снижение и преждевременное появление TAa2 на здоровой стороне. *Triceps surae* паретичной стороны демонстрировала сниженный TriA, в то время как на здоровой стороне отмечалась задержка данного пика биоэлектрической активности. *Quadriceps femoris* паретичной стороны демонстрировала задержку Qa1, снижение и раннее появление Qa2, в то время как на здоровой стороне отмечались увеличение и задержка Qa1, снижение и раннее появление Qa2. Биоэлектрическая активность

hamstring представлена сниженным и преждевременным HmA на обеих нижних конечностях.

Общие закономерности функционирования суставов на здоровой стороне характеризовались уменьшением амплитуды при полном сохранении основных функциональных профилей суставов. На паретичной стороне наблюдалось значительное снижение амплитуды (до 50% от нормы), при этом основные движения сохранялись только в тазобедренном и коленном суставах. В голеностопном суставе преимущественно выявлялся синдром отвисающей стопы различной степени тяжести.

Функция мышц варьировала в более широких пределах. Мышцы нижних конечностей на здоровой стороне и тем более на паретичной стороне демонстрировали значительно сниженную электромиографическую активность (ЭМГ). Мышцы бедра на здоровой стороне характеризовались ЭМГ-активностью выше нормы, в то время как паретичная сторона демонстрировала почти нормальную активность только для *quadriceps femoris* и значительно более низкую активность *hamstring*.

Дополнительные результаты исследования

В проведённом исследовании обнаружено, что функциональные варианты с точки зрения кинематики движений суставов паретичной конечности и функции мышц существенно отличаются. Например, функция коленного

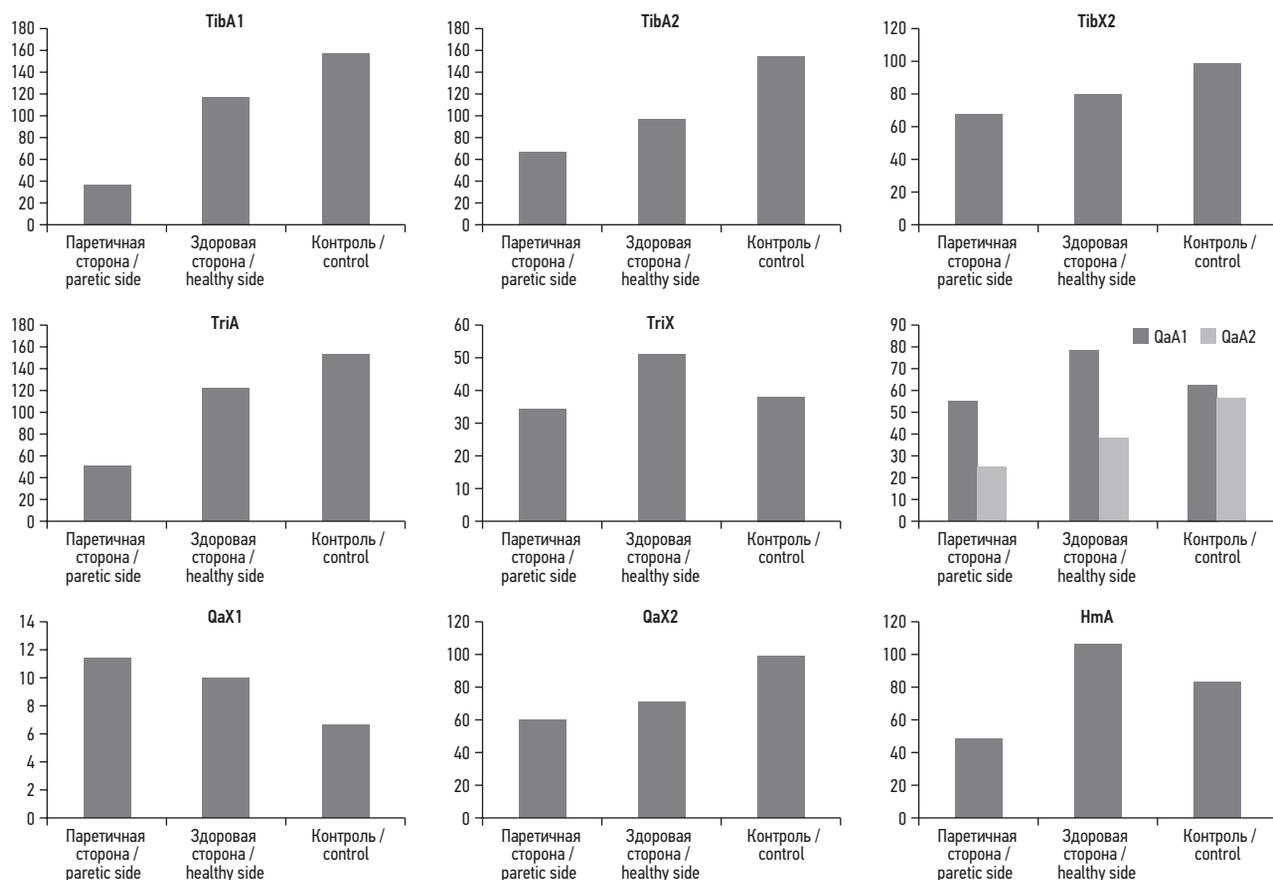


Рис. 5. Электромиографические параметры.

Fig. 5. Electromyographic parameters.

сустава может характеризоваться работой в амплитудах от некоторого начального сгибания, которое может только увеличиваться. Другой функционально противоположный вариант — пассивное замыкание коленного сустава в ПО (полное разгибание сустава). Свои варианты имеются как для других суставов, так и для исследуемых мышц. Часть этих феноменов известна и описана в литературе. Для их изучения требуется отдельное исследование.

Нежелательные явления

Прямых нежелательных явлений, связанных с проведением биомеханического исследования, не обнаружено.

ОБСУЖДЕНИЕ

Общие параметры ходьбы в группе пациентов продемонстрировали типичные для инсульта изменения биомеханики [12]. Они представлены лёгкой асимметрией в продолжительности ЦШ, нормальной продолжительностью ПО на паретичной стороне, значительным увеличением продолжительности ПО на здоровой стороне, а также укорочением ПОО на паретичной стороне.

Исследование выявило асимметрию, характеризующуюся снижением клиренса и увеличением циркумдукции на паретичной стороне.

Скорость ходьбы в группе пациентов была примерно в 2,5 раза меньше. Достоверно известно, что снижение скорости передвижения оказывает влияние на общие параметры ходьбы [9, 12, 13], следовательно, удлинение ПДО частично зависело от медленной скорости ходьбы, что привело к увеличению продолжительности ЦШ.

Обнаруженные различия в параметрах НВДО были важны, поскольку свидетельствовали о нарушении реципрокности. Здоровая конечность осуществляла контакт с поверхностью пола значительно раньше для разгрузки паретичной конечности, в то время как паретичная сторона контактировала с полом значительно позже. Обычно гармоничная походка характеризуется тем, что обе ноги начинают каждый ЦШ сразу же после того, как противоположная нога достигает 50% ЦШ, т.е. смещение одного ЦШ относительно другого составляет ровно полпериода (половину ЦШ).

Сравнение наших данных с опубликованными в литературе выявило некоторые различия. Поскольку изменения биомеханики ходьбы при гемипарезе имеют несколько вариантов [8], опубликованные результаты также отличаются в разных источниках. В обзоре D.M. Mohan и соавт. [14] типичные изменения в кинематике ходьбы у пациентов после инсульта включали уменьшение

разгибания в тазобедренном суставе, уменьшение сгибания в голеностопном суставе в ПО, уменьшение амплитуды сгибания в тазобедренном и коленном суставах и разгибания в голеностопном суставе в период переноса, а также уменьшенное разгибание коленного сустава во второй половине периода переноса. Один из специфических видов локомоции представлен гиперэкстензией колена, которая замыкает коленный сустав в середине ПО. Источники, цитируемые в [14] и опубликованные не ранее 1993 года, описывают некоторые закономерности биомеханики походки, обнаруженные в нашем исследовании.

Аномальная ЭМГ-активность была отмечена в работах [14–16]: повышенная активность *tibialis anterior*, ранняя активация *gastrocnemius* и поздняя активация *vastus lateralis*. Эти закономерности также наблюдались в нашем исследовании наряду с другими вариациями.

В наше исследование были включены только те пациенты, которые могли самостоятельно ходить, поэтому основная группа пациентов имела относительно лёгкие функциональные нарушения. Поскольку биомеханические параметры на паретичной стороне снижены, можно наблюдать несколько важных универсальных явлений, которые были описаны ранее [17]. Физиологически нормальные параметры являются оптимальными для функции ходьбы. Таким образом, при наличии функциональной способности компенсировать потерю двигательной активности биомеханика ходьбы адаптируется таким образом, чтобы паретичная сторона могла работать в режиме, близком к нормальному. В данном исследовании это проявилось в типичных изменениях временной структуры ЦШ: продолжительность ПО на паретичной стороне не отличалась от нормы. В результате практически нормальной продолжительности ПО соответствующие параметры (такие как Tx2, Kx3 и Gx2) на паретичной стороне также были ближе к нормальным значениям, чем на здоровой стороне.

Движения в суставах нижних конечностей варьировали от типичного снижения амплитуды до почти полного отсутствия движений или неконтролируемой свободы движений, что может наблюдаться в голеностопном суставе. В коленном суставе наблюдаются два различных типа качественных функциональных изменений. Первое — это лёгкое сгибание в коленном суставе на протяжении всего ПО, не переходящее в нейтральное положение. Второе — это гиперэкстензия коленного сустава, которая замыкает его во время ПОО.

Наши результаты согласуются с результатами некоторых предыдущих исследований [18, 19]. Однако для исследованной популяции пациентов было характерно более тяжёлое нарушение функции ходьбы, проявляющееся увеличением продолжительности ЦШ, снижением скорости и уменьшением амплитуды движений в коленном суставе. Кроме того, мы записали ЭМГ от четырёх мышц-сгибателей коленного и голеностопного суставов, что позволило нам оценить изменения в автоматизме мышц. За исключением

quadriceps femoris, другие исследуемые мышцы показали значительное снижение биоэлектрической активности, а также изменения в автоматизме, характеризующиеся смещением по времени максимальной активности.

Типичный вариант нарушений кинематики и биоэлектрической мышечной активности, характерных для пациентов с гемипарезом в раннем восстановительном периоде ишемического инсульта, представлен на рис. 6 и 7.

На паретичной стороне отмечаются снижение амплитуды движений во всех суставах на протяжении всего ЦШ, замыкание в коленном суставе в ПО, а также синдром отвисающей стопы, обнаруживаемый в период переноса. На здоровой стороне также отмечаются незначительное уменьшение амплитуды движений во всех суставах, а также их смещение относительно ЦШ, что обусловлено удлинением ПО и укорочением периода переноса на здоровой стороне.

К типичным ЭМГ-нарушениям на паретичной стороне относятся снижение амплитуды биоэлектрической активности мышц, а также нарушение их автоматизма. Так, отмечается преобладание второго пика активности *tibialis anterior*, смещение пика *gastrocnemius* к началу ЦШ и смещение первого пика активности *hamstring* к середине ЦШ. Здоровая сторона также демонстрирует изменения в мышечной активности: увеличение продолжительности первого пика *tibialis anterior*, смещение первого пика *quadriceps femoris* к центру ЦШ, а также увеличение продолжительности первого пика *hamstring*.

Ограничения исследования

Ограничения проведённого исследования связаны с местными правилами, согласно которым госпитализированные пациенты в среднем имеют более серьёзные нарушения по сравнению с аналогичными исследованиями. В будущем, возможно, удастся набрать значительно большее число участников и разделить их на две группы в зависимости от стороны гемипареза и типа кинематического нарушения, влияющего на движения суставов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данном исследовании были получены изменения биомеханических параметров ходьбы, характерные для пациентов с гемипарезом в раннем восстановительном периоде ишемического инсульта.

Асимметрия функции ходьбы характеризуется изменениями реципрокности, т.е. гармоничной последовательности движений. Наиболее значительные изменения произошли в кинематике коленного сустава и ЭМГ-активности *tibialis anterior*, *triceps surae* и *hamstring*.

Будущие исследования могут быть направлены на определение точных моделей ходьбы у пациентов в раннем восстановительном периоде ишемического инсульта для последующего обеспечения целенаправленной реабилитации.

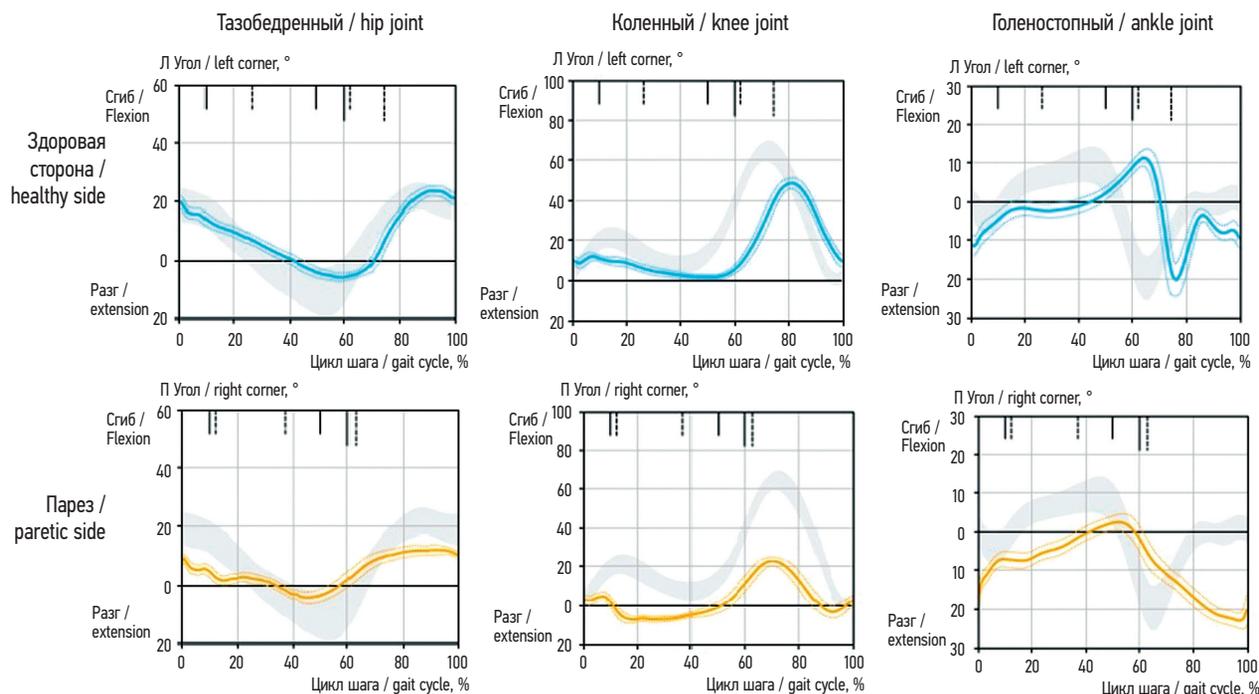


Рис. 6. Кинематические параметры тазобедренного, коленного и голеностопного суставов здоровой и паретичной сторон. Ось абсцисс — цикл шага (ЦШ, %); ось ординат — амплитуда движений в суставах (град.). Значения по оси ординат выше 0 соответствуют сгибанию в суставе, значения ниже 0 — разгибанию.

Fig. 6. Kinematic parameters of the hip, knee, and ankle joints on the healthy and paretic sides. Abscissa axis, gait cycle (%); ordinate axis, movement amplitude in joints (°). Ordinate axis values >0 correspond to flexion in the joint; values <0 correspond to extension.

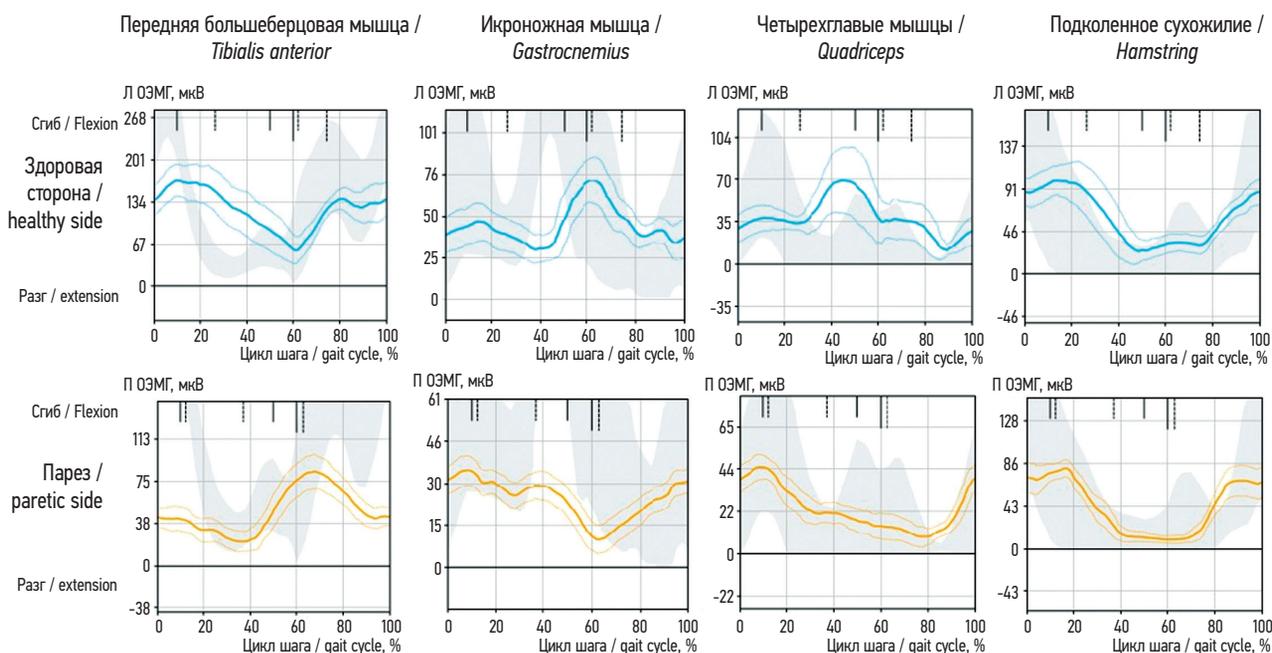


Рис. 7. Профили электромиографической активности мышц нижних конечностей на здоровой и паретичной стороне. Ось абсцисс — цикл шага (ЦШ, %); ось ординат — биоэлектрическая активность мышц (мкВ); Л ОЭМГ — левая ось электромиографической активности, П ОЭМГ — правая ось электромиографической активности.

Fig. 7. Profiles of electromyographic activity of lower limb muscles on the normal and paretic sides. Abscissa axis, gait cycle (%); ordinate axis, bioelectrical muscle activity (μV); Л ОЭМГ, the left axis of electromyographic activity; П ОЭМГ, the right axis of electromyographic activity.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Источник финансирования. Исследование выполнено в рамках государственного задания ФМБА России (НИР «Разработка новых технологий медицинской реабилитации у пациентов с поражениями и заболеваниями головного мозга»): АААА-А19-119042590030-2.

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией данной статьи.

Вклад авторов. Д.В. Скворцов — дизайн исследования, поиск и обработка литературы, написание рукописи; Н.В. Гребенкина — поиск и обработка литературы, статистическая обработка, написание рукописи; С.Н. Кауркин — проведение исследования, обработка данных; Г.Е. Иванова — общее руководство, дизайн исследования. Все авторы подтверждают соответствие своего авторства международным критериям ICMJE (все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией).

ADDITIONAL INFORMATION

Funding source. The study was carried out within the framework of the state assignment of the Federal Medical and Biological Agency of Russia (R&D “Development of new technologies of medical rehabilitation in patients with brain lesions and diseases”): АААА-А19-119042590030-2.

Competing interests. The authors declare that they have no competing interests.

Author contribution. D.V. Skvortsov — study design, literature search and processing, manuscript writing; N.V. Grebenkina — literature search and processing, statistical processing, manuscript writing; S.N. Kaurkin — study conduct, data processing; G.E. Ivanova — general supervision, study design. All authors made a substantial contribution to the conception of the work, acquisition, analysis, interpretation of data for the work, drafting and revising the work, final approval of the version to be published and agree to be accountable for all aspects of the work.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Martin S.S., Aday A.W., Almarzoq Z.I., et al. 2024 Heart disease and stroke statistics: A report of US and global data from the American Heart Association // *Circulation*. 2024. Vol. 149, N 8. P. e347–e913. EDN: RGAVBF doi: 10.1161/CIR.0000000000001209
- Feigin V.L., Brainin M., Norrving B., et al. World Stroke Organization (WSO): Global stroke fact sheet 2022 // *Int J Stroke*. 2022. Vol. 17, N 1. P. 18–29. doi: 10.1177/17474930211065917. Erratum in: *Int J Stroke*. 2022;17(4):478. doi: 10.1177/17474930221080343
- Игнатъева В.И., Вознюк И.А., Шамалов Н.А., и др. Социально-экономическое бремя инсульта в Российской Федерации // *Журнал неврологии и психиатрии им. С.С. Корсакова. Спецвыпуски*. 2023. Т. 123, № 8-2. С. 5–15. EDN: QEIVCM doi: 10.17116/jnevro20231230825
- Aqueveque P., Ortega P., Pino E., et al. After stroke movement impairments: A review of current technologies for rehabilitation. Chapter 7 // *Physical Disabilities Therapeutic Implications*. 2017. P. 95–116. doi: 10.5772/67577
- Duncan P.W., Zorowitz R., Bates B., et al. Management of adult stroke rehabilitation care: A clinical practice guideline // *Stroke*. 2005. Vol. 36, N 9. P. e100–143. doi: 10.1161/01.STR.0000180861.54180.FF
- Batchelor F.A., Mackintosh S.F., Said C.M., Hill K.D. Falls after stroke // *Int J Stroke*. 2012. Vol. 7, N 6. P. 482–490. doi: 10.1111/j.1747-4949.2012.00796.x
- Van der Kooij E., Schiemanck S.K., Nollet F., et al. Falls are associated with lower self-reported functional status in patients after stroke // *Arch Phys Med Rehabil*. 2017. Vol. 98, N 12. P. 2393–2398. doi: 10.1016/j.apmr.2017.05.003
- Perry J., Burnfield J.M. *Gait analysis: Normal and pathological function*. New Jersey: Slack Incorporated, 2010. 576 p.
- Wang Y., Mukaino M., Ohtsuka K., et al. Gait characteristics of post-stroke hemiparetic patients with different walking speeds // *Int J Rehabil Res*. 2020. Vol. 43, N 1. P. 69–75. doi: 10.1097/MRR.0000000000000391
- Скворцов Д.В., Кауркин С.Н., Иванова Г.Е., и др. Целенаправленная тренировка ходьбы в раннем восстановительном периоде

у больных с церебральным инсультом (предварительное исследование) // *Клиническая практика*. 2021. Т. 12, № 4. С. 12–22. EDN: BTOFFV doi: 10.17816/clinpract77334

11. Almeida A. do S.S., Viana da Cruz A.T., Candeira S.R., et al. Late physiotherapy rehabilitation changes gait patterns in post-stroke patients // *Biomedical Human Kinetics*. 2017. Vol. 9, N 1. P. 14–18. doi: 10.1515/bhk-2017-0003

12. Patterson K.K., Gage W.H., Brooks D., et al. Evaluation of gait symmetry after stroke: A comparison of current methods and recommendations for standardization // *Gait Posture*. 2010. Vol. 31, N 2. P. 241–246. EDN: NYMQAJ doi: 10.1016/j.gaitpost.2009.10.014

13. Matsuzawa Y., Miyazaki T., Takeshita Y., et al. Effect of leg extension angle on knee flexion angle during swing phase in post-stroke gait // *Medicina (Kaunas)*. 2021. Vol. 57, N 11. P. 1222. doi: 10.3390/medicina57111222

14. Mohan D.M., Khandoker A.H., Wasti S.A., et al. Assessment methods of post-stroke gait: A scoping review of technology-driven approaches to gait characterization and analysis // *Front Neurol*. 2021. Vol. 12. P. 650024. EDN: KOBWZX doi: 10.3389/fneur.2021.650024

15. Balaban B., Tok F. Gait disturbances in patients with stroke // *PM R*. 2014. Vol. 6, N 7. P. 635–642. doi: 10.1016/j.pmrj.2013.12.017

16. Srivastava S., Patten C., Kautz S.A. Altered muscle activation patterns (AMAP): An analytical tool to compare muscle activity patterns of hemiparetic gait with a normative profile // *J Neuroeng Rehabil*. 2019. Vol. 16, N 1. P. 21. doi: 10.1186/s12984-019-0487-y

17. Скворцов Д.В. Диагностика двигательной патологии инструментальными методами: анализ походки, стабилметрия. Москва: Научно-медицинская фирма МБН. 2007. 620 с.

18. Kim H., Kim Y.H., Kim S.J., Choi M.T. Pathological gait clustering in post-stroke patients using motion capture data // *Gait Posture*. 2022. Vol. 94. P. 210–216. EDN: KWOPRU doi: 10.1016/j.gaitpost.2022.03.007

19. Wang Y., Tang R., Wang H., et al. The validity and reliability of a new intelligent three-dimensional gait analysis system in healthy subjects and patients with post-stroke // *Sensors (Basel)*. 2022. Vol. 22, N 23. P. 9425. EDN: CFRYTO doi: 10.3390/s22239425

REFERENCES

- Martin SS, Aday AW, Almarzooq ZI, et al. 2024 Heart disease and stroke statistics: A report of US and global data from the American Heart Association. *Circulation*. 2024;149(8):e347–e913. EDN: RGAUVF doi: 10.1161/CIR.0000000000001209
- Feigin VL, Brainin M, Norrving B, et al. World Stroke Organization (WSO): Global stroke fact sheet 2022. *Int J Stroke*. 2022;17(1):18–29. doi: 10.1177/17474930211065917. Erratum in: *Int J Stroke*. 2022;17(4):478. doi: 10.1177/17474930221080343
- Ignatyeva VI, Voznyuk IA, Shamalov NA, et al. Social and economic burden of stroke in Russian Federation. *S.S. Korsakov J Neurol Psychiatry*. Special Editions. 2023;123(8-2):5–15. EDN: QEIVCM doi: 10.17116/jnevro20231230825
- Aqueveque P, Ortega P, Pino E, et al. *After stroke movement impairments: A review of current technologies for rehabilitation*. Chapter 7. In: *Physical Disabilities Therapeutic Implications*. 2017. P. 95–116. doi: 10.5772/67577
- Duncan PW, Zorowitz R, Bates B, et al. Management of adult stroke rehabilitation care: A clinical practice guideline. *Stroke*. 2005;36(9):e100–143. doi: 10.1161/01.STR.0000180861.54180.FF
- Batchelor FA, Mackintosh SF, Said CM, Hill KD. Falls after stroke. *Int J Stroke*. 2012;7(6):482–490. doi: 10.1111/j.1747-4949.2012.00796.x
- Van der Kooij E, Schiemanck SK, Nollet F, et al. Falls are associated with lower self-reported functional status in patients after stroke. *Arch Phys Med Rehabil*. 2017;98(12):2393–2398. doi: 10.1016/j.apmr.2017.05.003
- Perry J, Burnfield JM. *Gait analysis: Normal and pathological function*. New Jersey: Slack Incorporated; 2010. 576 p.
- Wang Y, Mukaino M, Ohtsuka K, et al. Gait characteristics of post-stroke hemiparetic patients with different walking speeds. *Int J Rehabil Res*. 2020;43(1):69–75. doi: 10.1097/MRR.0000000000000391
- Skvortsov DV, Kaurkin SN, Ivanova GE, et al. Targeted walking training of patients in the early recovery period of cerebral stroke (preliminary research). *J Clin Pract*. 2021;12(4):12–22. EDN: BTOFFV doi: 10.17816/clinpract77334
- Almeida A do SS, Viana da Cruz AT, Candeira SR, et al. Late physiotherapy rehabilitation changes gait patterns in post-stroke patients. *Biomedical Human Kinetics*. 2017;9(1):14–18. doi: 10.1515/bhk-2017-0003
- Patterson KK, Gage WH, Brooks D, et al. Evaluation of gait symmetry after stroke: A comparison of current methods and recommendations for standardization. *Gait Posture*. 2010;31(2):241–246. EDN: NYMQAJ doi: 10.1016/j.gaitpost.2009.10.014
- Matsuzawa Y, Miyazaki T, Takeshita Y, et al. Effect of leg extension angle on knee flexion angle during swing phase in post-stroke gait. *Medicina (Kaunas)*. 2021;57(11):1222. doi: 10.3390/medicina57111222
- Mohan DM, Khandoker AH, Wasti SA, et al. Assessment methods of post-stroke gait: A scoping review of technology-driven approaches to gait characterization and analysis. *Front Neurol*. 2021;12:650024. EDN: KOBWZX doi: 10.3389/fneur.2021.650024
- Balaban B, Tok F. Gait disturbances in patients with stroke. *PMR*. 2014;6(7):635–642. doi: 10.1016/j.pmrj.2013.12.017
- Srivastava S, Patten C, Kautz SA. Altered muscle activation patterns (AMAP): An analytical tool to compare muscle activity patterns of hemiparetic gait with a normative profile. *J Neuroeng Rehab*. 2019;16(1):21. doi: 10.1186/s12984-019-0487-y
- Skvortsov DV. *Diagnostics of motor pathology by instrumental methods: Gait analysis, stabilometry*. Moscow: Nauchno-meditsinskaya firma MBN; 2007. 620 p.
- Kim H, Kim YH, Kim SJ, Choi MT. Pathological gait clustering in post-stroke patients using motion capture data. *Gait Posture*. 2022;94:210–216. EDN: KWOPRU doi: 10.1016/j.gaitpost.2022.03.007
- Wang Y, Tang R, Wang H, et al. The validity and reliability of a new intelligent three-dimensional gait analysis system in healthy subjects and patients with post-stroke. *Sensors (Basel)*. 2022;22(23):9425. EDN: CFRYTO doi: 10.3390/s22239425

ОБ АВТОРАХ

* Гребенкина Наталья Вячеславовна;

адрес: Россия, 117513, Москва, ул. Островитянова, д. 1, стр.10;
ORCID: 0000-0002-8441-2285;
eLibrary SPIN: 6621-3836;
e-mail: grebenkina_nv@rsmu.ru

Скворцов Дмитрий Владимирович, д-р мед. наук, профессор;

ORCID: 0000-0002-2794-4912;
eLibrary SPIN: 6274-4448;
e-mail: dskvorts63@mail.ru

Кауркин Сергей Николаевич, канд. мед. наук, доцент;

ORCID: 0000-0001-5232-7740;
eLibrary SPIN: 4986-3575;
e-mail: kaurkins@bk.ru

Иванова Галина Евгеньевна, д-р мед. наук, профессор;

ORCID: 0000-0003-3180-5525;
eLibrary SPIN: 4049-4581;
e-mail: reabilivanova@mail.ru

AUTHORS' INFO

* Natalya V. Grebenkina;

address: 1/10 Ostrovityanova street, 117513 Moscow, Russia;
ORCID: 0000-0002-8441-2285;
eLibrary SPIN: 6621-3836;
e-mail: grebenkina_nv@rsmu.ru

Dmitry V. Skvortsov, MD, Dr. Sci. (Medicine), Professor;

ORCID: 0000-0002-2794-4912;
eLibrary SPIN: 6274-4448;
e-mail: dskvorts63@mail.ru

Sergey N. Kaurkin, MD, Cand. Sci. (Medicine), Associate Professor;

ORCID: 0000-0001-5232-7740;
eLibrary SPIN: 4986-3575;
e-mail: kaurkins@bk.ru

Galina E. Ivanova, MD, Dr. Sci. (Medicine), Professor;

ORCID: 0000-0003-3180-5525;
eLibrary SPIN: 4049-4581;
e-mail: reabilivanova@mail.ru

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author