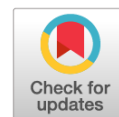


DOI: <https://doi.org/10.17816/rjpbr643515>

EDN: IDYRMV



Анализ походки у детей с рассеянным склерозом

М.А. Боровик^{1, 2}, И.О. Ведерников¹, О.А. Лайшева^{1, 2}, Э.Ю. Волкова¹, Т.С. Ковальчук¹

¹ Российская детская клиническая больница, Москва, Россия;

² Российский национальный исследовательский медицинский университет им. Н.И. Пирогова, Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Обоснование. Из общего количества пациентов с установленным диагнозом рассеянного склероза, по разным источникам, от 3 до 10% составляют дети. В 75% случаев у всех заболевших уже на ранней стадии наблюдаются изменения походки, но в клинических рекомендациях, утверждённых Минздравом Российской Федерации 2022 г., нет данных по использованию инструментальных методов её оценки у детей.

Цель исследования — изучить особенности двигательного статуса детей с ремиттирующим рассеянным склерозом с помощью инструментального анализа походки с применением поверхностной электромиографии.

Материалы и методы. Наше исследование обсервационное, одноцентровое, проспективное, сплошное. Объект исследования — пациенты ($n=38$) Российской детской клинической больницы от 9 до 17 лет из отделения психоневрологии с подтверждённым диагнозом рассеянного склероза. Всем больным провели инструментальную диагностику походки с применением поверхностной электромиографии мышц нижних конечностей, тест 6-минутной ходьбы, а также магнитно-резонансную томографию с контрастированием головного и спинного мозга.

Результаты. Пациенты имели низкий уровень инвалидизации (по шкале EDSS не более 2,5 баллов) и были способны к самостоятельному передвижению. При 6-минутном тесте у большинства больных пройденное расстояние соответствовало возрастной норме, среднее значение составляло 520,92 м. При анализе результатов поверхностной электромиографии в 44,74% случаев зафиксированы характерные изменения электромиографической активности икроножных мышц в фазе одиночной опоры в двух вариантах — преждевременная активация и продолжающаяся активация мышцы с появлением второго пика на графике.

Заключение. В результате исследования зарегистрировано снижение толерантности к физической нагрузке, а также характерные изменения по данным поверхностной электромиографии в икроножных мышцах в виде двух вариантов — продолжающаяся активация мышцы в фазе отдыха в течение цикла шага и преждевременная активация в период опоры. Выявленные изменения могут служить маркерами показаний к проведению медицинской реабилитации и оценки эффективности лечения. Из-за ограничения объёма выборки исследования данного феномена требуется дальнейшее изучение.

Ключевые слова: рассеянный склероз; поверхностная электромиография; реабилитация; походка.

Как цитировать:

Боровик М.А., Ведерников И.О., Лайшева О.А., Волкова Э.Ю., Ковальчук Т.С. Анализ походки у детей с рассеянным склерозом // Физиотерапия, бальнеология и реабилитация. 2025. Т. 24, № 2. С. 84–96. DOI: 10.17816/rjpbr643515 EDN: IDYRMV

DOI: <https://doi.org/10.17816/rjpbr643515>

EDN: IDYRMY

Gait analysis in children with multiple sclerosis

Margarita A. Borovik^{1, 2}, Igor O. Vedernikov¹, Olga A. Laysheva^{1, 2},
Elvira Yu. Volkova¹, Timofey S. Kovalchuk¹

¹ Russian Children's Clinical Hospital, Moscow, Russia;

² The Russian National Research Medical University named after N.I. Pirogov, Moscow, Russia

ABSTRACT

BACKGROUND: According to various sources, children account for 3 to 10% of all patients diagnosed with multiple sclerosis. In 75% of all affected individuals, gait abnormalities are present even at early disease stages. However, the 2022 clinical guidelines issued by the Ministry of Health of the Russian Federation do not address the use of instrumental gait analysis in pediatric patients.

AIM: To investigate the motor status of children with relapsing-remitting multiple sclerosis using instrumental gait analysis and surface electromyography.

MATERIALS AND METHODS: Our study was an observational, single-center, prospective, and continuous study. The study population consisted of patients ($n=38$), aged 9–17 years, from the department of psychoneurology at the Russian Children's Clinical Hospital with a confirmed diagnosis of multiple sclerosis. All patients underwent the following assessments: instrumental gait analysis using surface electromyography of the lower limb muscles, the 6-minute walk test, contrast-enhanced MRI of the brain and spinal cord.

RESULTS: Patients exhibited low disability levels (EDSS ≤ 2.5) and maintained independent ambulation. The 6-minute walk test demonstrated an average walking distance of 520.92 m, consistent with age norms. surface electromyography analysis revealed characteristic abnormalities in 44.74% of cases, particularly in the gastrocnemius muscles during the single-support phase, manifesting as premature activation and sustained activation with a secondary peak in the electromyography signal.

CONCLUSION: The study documented decreased tolerance to physical exertion, along with characteristic surface electromyography changes in the gastrocnemius muscles, specifically: sustained activation during the resting phase of the gait cycle and premature activation during the stance phase. These findings may serve as biomarkers for rehabilitation indications and treatment effectiveness assessment. However, further studies are required due to the limited sample size.

Keywords: multiple sclerosis; surface electromyography; rehabilitation; gait.

To cite this article:

Borovik MA, Vedernikov IO, Laysheva OA, Volkova EYu, Kovalchuk TS. Gait analysis in children with multiple sclerosis. *Russian journal of the physical therapy, balneotherapy and rehabilitation*. 2025;24(2):84–96. DOI: 10.17816/rjpbr643515 EDN: IDYRMY

Submitted: 27.12.2024

Accepted: 27.01.2025

Published online: 03.03.2025

多发性硬化患儿步态分析

Margarita A. Borovik^{1,2}, Igor O. Vedernikov¹, Olga A. Laysheva^{1,2},
Elvira Yu. Volkova¹, Timofey S. Kovalchuk¹

¹ Russian Children's Clinical Hospital, Moscow, Russia;

² The Russian National Research Medical University named after N.I. Pirogov, Moscow, Russia

摘要

论证。据不同文献报道，在被诊断为多发性硬化的患者中，儿童占比约3% - 10%。在所有患者中，约75%在疾病早期即出现步态异常。然而，在俄罗斯联邦卫生部于2022年批准的临床指南中，尚无针对儿童步态分析的仪器评估方法的数据。

研究目的。利用步态分析仪器结合表面肌电图，研究复发缓解型多发性硬化患儿的运动状态特征。

材料与方法。本研究为单中心、前瞻性观察性全样本研究。研究对象为Russian Children's Clinical Hospital精神神经科确诊为多发性硬化的9 - 17岁患者（ $n=38$ ）。所有患者均接受下肢肌群的步态分析和表面肌电图评估，同时进行了6分钟步行测试以及增强磁共振成像以评估脑部和脊髓病变情况。

结果。研究对象的残疾程度较低（EDSS评分 ≤ 2.5 ），均可独立行走。6分钟步行测试结果 显示，大多数患者的步行距离符合该年龄段正常范围，平均步行距离为520.92米。在表面肌电图分析中，44.74%的患者表现出腓肠肌在单腿支撑相期间的肌电活动异常，表现为肌肉过早激活以及步态周期支撑相的持续激活，并出现第二个峰值。

结论。研究发现，患儿对运动负荷的耐受性降低，并在表面肌电图评估中显示腓肠肌存在异常激活模式，即步态周期的非负重期持续激活以及支撑期的过早激活。这些变化可作为医学康复的潜在指征，并有助于评估治疗效果。由于样本量的限制，该现象仍需进一步研究。

关键词：多发性硬化；表面肌电图；康复；步态。

引用本文：

Borovik MA, Vedernikov IO, Laysheva OA, Volkova EYu, Kovalchuk TS. 多发性硬化患儿步态分析. *Russian journal of the physical therapy, balneotherapy and rehabilitation*. 2025;24(2):84-96. DOI: 10.17816/rjpbr643515 EDN: IDYRMV

ОБОСНОВАНИЕ

Демиелинизация лежит в основе патогенеза развития рассеянного склероза (РС). Миелиновая оболочка обеспечивает ряд важных функций, таких как увеличение скорости передачи импульса, защитная функция, предотвращение перекрёстной передачи импульсов от одного волокна к другому в смешанном нерве. Процесс демиелинизации влияет на проведение нервного импульса по волокнам нервной системы, приводит к блокаде проведения или снижению скорости. Процесс ремиелинизации обеспечивает нейропротективное действие, а при сохранении демиелинизации волокна теряют трофическую и метаболическую поддержку, что приводит к необратимым повреждениям и гибели аксонов. Кроме того, в демиелинизированных волокнах могут происходить процессы повышения возбудимости и генерации эктопических импульсов в месте демиелинизации. Клинически у пациентов наблюдаются пароксизмальные симптомы, такие как тонические спазмы, дизартрии, парестезии, боли. Ещё один интересный феномен демиелинизированного волокна — это возбуждение в ответ на механическую деформацию, что объясняет симптом Лермитта, а также поперечно распространяющаяся активация аксонов с частичной демиелинизацией волокон [1].

Одним из интересных симптомов при РС является синдром «клинического расщепления». Он был описан в 1976 г. Д.А. Марковым и А.Л. Леонович и характеризуется несоответствием субъективных ощущений пациента и его клинической картины объективным симптомам поражения проводящих путей [2]. Для них характерно, что клиническая картина связана больше с блокадой проведения импульса, нежели с замедлением и нарушением проведения высокочастотных импульсов. При этом даже очень грубые нарушения задержки импульсов могут не ощущаться пациентами, за исключением потери ощущения вибрации [3]. Функциональные нарушения проводимости в большей мере коррелируют с клиническими проявлениями, чем со структурными повреждениями центральной нервной системы (ЦНС) [4].

Несмотря на то что РС является заболеванием ЦНС, исследования доказывают, что изменения также могут наблюдаться и в периферической нервной системе и могут быть зарегистрированы при электронейромиографии. Например, в исследованиях Н.В. Домрес описывается как ранний электронейромиографический признак спастичности снижение амплитуды М-ответа и изменение F-волны [5].

Несмотря на все эти особенности, двигательные нарушения у пациентов с РС занимают ведущее клиническое значение, так как являются наиболее значимым фактором ограничения функции/инвалидации. С частотой 91,7% наблюдаются признаки поражения пирамидной системы, которые проявляются в виде появления патологических рефлексов, парезов разной степени. Уже при лёгкой

степени тяжести (EDSS до 3 баллов) в 30,5% развиваются двигательные нарушения [6]. При первично прогрессирующем и вторично прогрессирующем течении нарушения походки встречались на 20% чаще, чем при ремиттирующем РС. Анализ походки с развитием диагностических возможностей посвящено множество исследований. При РС у взрослых изменения показателей инструментального анализа походки могут определяться большим разнообразием причин, таких как слабость мышц, повышенная утомляемость, спастичность, нарушение чувствительности, дисфункции мозжечка и вестибулярного аппарата, нарушения зрения. Изменения удаётся фиксировать уже при лёгкой степени РС, даже при отсутствии жалоб со стороны пациента и небольшой длительности заболевания. В 75% случаев на ранней стадии заболевания при лёгкой степени инвалидации уже наблюдаются клинически значимые изменения походки [7]. Внимание к данной проблеме обусловлено большим влиянием походки на качество жизни и степень инвалидации. Несмотря на адаптивные процессы в мозге (нейропластичность), идёт накопление повреждений. Выраженность нарушений нарастает параллельно с прогрессированием заболевания.

При анализе походки наблюдаются кинематические и кинетические изменения преимущественно в голеностопном и коленном суставах [8]. Походка становится более асимметричной и менее координированной по мере прогрессирования заболевания. Понижение отталкивающей способности голеностопного сустава при РС является важным фактором, снижающим эффективность походки, что, возможно, связано с неврологическими нарушениями мышц тыльных и подошвенных сгибателей стопы, такими как слабость, спастичность и изменение рекрутирования [9]. При РС с минимальными нарушениями происходит снижение скорости походки, укорочение длины шага, интервал двойной опоры [10, 11]. При EDSS 1–1,5 балла уже может наблюдаться снижение скорости ходьбы, уменьшение мышечной силы нижних конечностей и ухудшение баланса. Выявлены изменения в вертикальном, продольном и поперечном компоненте силы реакции опоры, что проявляется в снижении опорной функции нижней конечности [12]. Нарушения, как правило, связывают с пирамидной недостаточностью, поражением мозжечковых трактов и даже с апраксией. При пирамидной недостаточности более характерна асимметрия времени шага и одиночной опоры. Происходит нагружение головок II и III плюсневых костей. Однако при сенсорных нарушениях качество походки относительно сохранено. В ряде случаев с мозжечковой симптоматикой наблюдалось увеличение нагрузки на IV и V плюсневые кости [5]. Пациенты с РС демонстрируют меньшую нагрузку на пятку, область центральных плюсневых костей, таким образом, мы можем чаще наблюдать у них «полую» стопу [13].

В ряде исследований описывается снижение амплитуды разгибания бедра в периоде опоры, уменьшение

амплитуды сгибания коленного сустава во время периода переноса, уменьшение амплитуды тыльного сгибания в голеностопном суставе во время периода одиночной опоры и уменьшение амплитуды подошвенного сгибания во время периода второй двойной опоры [11].

Во время ходьбы пациенты с РС часто отмечают повышенную утомляемость, которая связана с тем, что они прикладывают большие усилия и, как следствие, затрачивают больше энергии. Для диагностики аномальных реакций на нагрузку хорошо себя зарекомендовала поверхностная электромиография (пЭМГ) в процессе ходьбы. Так, в некоторых работах регистрировалась повышенная утомляемость камбаловидной мышцы во время длительной ходьбы [9], но изменения в электромиографии могут наблюдаться в результате комбинации симптомов РС.

С помощью пЭМГ у пациентов обнаружены нарушения в мышцах, проявляющиеся в виде повышенной коактивации. Сам процесс коактивации, известный как взаимозависимое действие, проявляется в дифференцированном дозированном сокращении мышц-агонистов и антагонистов в момент движения в одном суставе, что позволяет осуществлять движение плавно и стабилизирует сустав во время активности. Чрезмерная коактивация является ранним объективным симптомом при нарушении мышечного баланса и, соответственно, мышечного контроля, что, в свою очередь, может привести к нестабильности в суставе. Эта взаимосвязь приводит к увеличению энергозатрат во время ходьбы и является одной из причин повышения утомляемости, приводит к изменению крутящих моментов в суставе и вызывает повышение жёсткости [8]. Таким образом, снижение стабильности во время ходьбы связано в том числе с потерей аксонов кортикоспинального тракта, что является возможным чувствительным индикатором нейродегенерации [14].

В других исследованиях описаны характеристики биоэлектрической активности паретичных мышц, проявляющейся в виде снижения амплитуды с изменением фазовой активности. Увеличение длительности фазовой биоэлектрической активности свидетельствовало о компенсаторной реакции при снижении силы заинтересованных мышц, обеспечивающей достаточную опороспособность конечностей [12].

Исследования походки при РС в педиатрии также показали изменения: уменьшение диапазона движений в тазобедренных суставах, уменьшение скорости передвижения в сравнении со здоровыми сверстниками [15]. В клинических рекомендациях по реабилитации пациентов с РС, утверждённых в 2022 г. в Российской Федерации, нет данных по использованию инструментальных методов анализа походки для ранней диагностики и оценки эффективности терапии [16].

Преимущество этого метода с использованием пЭМГ перед другими стандартными тестами позволит провести диагностику на ранних стадиях заболевания, когда другие симптомы могут быть незаметны при клиническом

осмотре. Таким образом, разработка тактики реабилитации на базе полученных данных делает её более целенаправленной и, соответственно, более эффективной.

Цель

Изучение данных инструментального анализа походки у детей с РС для оптимизации процессов ранней диагностики нарушения походки и медицинской реабилитации.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Дизайн исследования

Обсервационное одноцентровое проспективное сплошное исследование.

Критерии соответствия

Критерии включения:

- подтверждённый диагноз (G35 — рассеянный склероз) у пациентов по международным критериям МакДональда;
- возраст с 9 до 17 лет;
- способность к самостоятельной ходьбе без дополнительных средств реабилитации, сохранная функция зрения;
- подписанное информированное согласие на участие в исследовании.

Критерии невключения:

- общие противопоказания для лечебной физкультуры;
- ограничения функции, влияющих на ходьбу, в связи с другими заболеваниями.

Критерии исключения:

- отказ пациента от исследования;
- присоединение сопутствующего заболевания в процессе исследования.

Условия проведения

Исследование проводили на базе отделения медицинской реабилитации для детей и психоневрологического отделения для детей старшего возраста Российской детской клинической больницы — филиала Российского национального исследовательского медицинского университета им. Н.И. Пирогова.

Продолжительность исследования

Исследование проводили в период с февраля по декабрь 2024 г.

Описание медицинского исследования

При плановом поступлении пациентов в отделение психоневрологии назначали консультацию врача по лечебной физкультуре, который оценивал двигательный статус и соответствие критериям включения в исследование. Пациенты подписывали информационное добровольное

согласие на участие в исследовании. В рамках госпитализации пациенты проходили диагностику на аппарате магнитной резонансной томографии (МРТ) головного и спинного мозга с контрастированием, результаты сравнивали с МРТ-картиной предыдущей госпитализации. Все пациенты ранее проходили МРТ-диагностику. Пациенты проходили однократное исследование толерантности к физической нагрузке с помощью тестирования (6-минутный тест ходьбы) и инструментального анализа походки на аппарате «Стэдис» компании Нейрософт (Россия). Данные исследования проводил врач по лечебной физкультуре, имеющий высшее медицинское образование и прошедший ординатуру в соответствующей области. Кроме того, специалист, проводивший анализ походки, имел сертификат о прохождении курсов по анализу походки (Clinical Gait Analysis: CPD, Pediatric Gait Analysis and Orthotic Management: Oscar). Все данные проанализированы специалистами с опытом работы более 10 лет в области детской реабилитации.

В ходе инструментального анализа походки оценивали ЭМГ-активность икроножной мышцы. D.A. Winter в своём исследовании описывает график ЭМГ-активности данной мышцы у здоровых людей в виде купола с максимальным пиком, приходящимся на 40% цикла шага, в период одноночной опоры, в момент максимального изометрического сокращения икроножной мышцы, с периодом быстрого полного затухания (рис. 1) [17].

Этическая экспертиза

Проведение исследования одобрено локальным этическим комитетом РДКБ — филиала РНИМУ им. Н.И. Пирогова (Пироговский университет). Выписка из протокола № 25 от 26.11.2024. Все участники исследования добровольно подписали форму информированного согласия до включения в исследование.

ОЭМГ, мкВ | EMG, μV

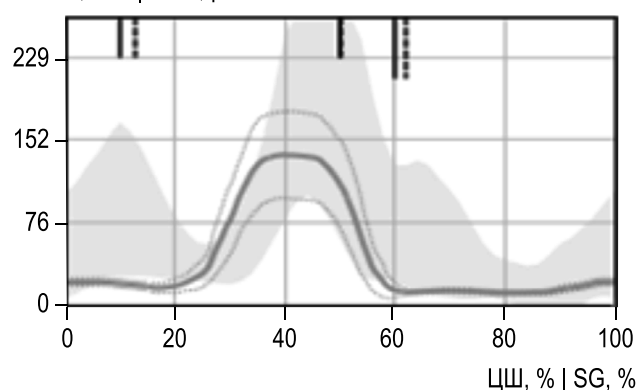


Рис. 1. График амплитуды огибающей электромиографии икроножной мышцы в цикле шага в норме.

ОЭМГ — огибающая электромиография; ЦШ — цикл шага.

Fig. 1. Graph of the envelope amplitude of gastrocnemius muscle electromyography during the gait cycle.

EMG — electromyography envelope; SG — step cycle.

Методы регистрации

Пациентам проводили инструментальный анализ походки с использованием пЭМГ икроножных мышц в соответствии с рекомендациями SENIAM (Surface ElectroMyoGraphy for the Non-Invasive Assessment of Muscles). Процедура включала следующие этапы:

- Использовали круглые электроды диаметром 10 мм.
- Межэлектродное расстояние (расстояние от центра одного электрода до центра другого) составляло 20 мм.
- Свободную часть кабеля электродов фиксировали на ноге с помощью эластичной ленты.
- Волосы в области размещения электродов сбривали, а кожу обрабатывали спиртом. Проводили пилинг кожи. Электроды размещали после полного высыхания кожи.
- Установку электродов производили в соответствии с Атласом электромиографии и мануально-мышечным тестированием для определения максимального выступающего места мышцы, с ориентацией линии между двумя биполярными электродами вдоль мышечного волокна.
- Использовали одноразовые биполярные электроды с изолирующим слоем Ag/AgCl.
- Фильтрация данных высоких частот была установлена на 5 Гц, а сетевых помех — на 50 Гц. Сигналы ЭМГ измеряли с частотой 2000 Гц.

Методы регистрации исходов

Для регистрации параметров походки пациента использовали 8 инерциальных сенсоров, которые устанавливали на нижние конечности пациента в области стоп, нижней трети голени, верхней трети бёдер, крестца и на уровне XII грудного позвонка. Крепление сенсоров производится с помощью эластичных лент и держателей. Датчики регистрировали ускорение по трём осям, скорость вращения — по трём осям. Два датчика, расположенные в области нижней трети большеберцовой кости, дополнительно регистрировали сЭМГ по двум дифференциальным каналам с частотой до 2000 Гц от переднебольшеберцовой мышцы и икроножной мышцы. Пациенту предлагается пройти в течение 2 мин, не менее 8–10 шагов по прямой, за это время сенсоры регистрируют параметры походки. Зарегистрированные сенсорами данные передаются по протоколу Wi-Fi в персональный компьютер для хранения и обработки. Программное обеспечение, установленное на персональный компьютер, преобразует данные сенсоров в понятную для врача форму, а именно: временные, пространственные и кинематические параметры ходьбы, а также график амплитуды огибающей электромиографии со значениями в микровольтах (мкВ). Полученные данные могут напрямую использоваться для анализа имеющихся нарушений и построения заключений.

Статистический анализ

Принципы расчёта размера выборки

Размер выборки данного исследования обусловлен поступлением пациентов на госпитализацию в больницу. Заболеваемость детей РС достаточно низкая, но из-за специфики работы нашей больницы мы имеем возможность наблюдать достаточное количество пациентов со всех регионов Российской Федерации.

Методы статистического анализа данных

Статистический анализ данных проводили с помощью пакета Statistic 10. Использовали критерий Шапиро-Уилка для определения нормальности распределения данных. В результате оценки данные не имели нормального распределения, поэтому в описательной статистике оценивали медиану, 1-й и 3-й квартили. Сравнение качественных независимых выборок проводили по критерию хи-квадрат с построением таблиц сопряжённости (при анализе связи нескольких качественных данных) с поправкой Йетса, так как частоты некоторых признаков были меньше 10. Для сравнения количественных данных использовали t-критерий.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Объекты (участники) исследования

Обследованы 38 пациентов в возрасте от 9 до 17 лет с установленным диагнозом: «РС, ремиттирующий тип течения заболевания». Средний возраст составлял 15 IQR (12–16) лет. Все пациенты имели низкий уровень инвалидизации (по шкале EDSS до 2,5 баллов). Средняя продолжительность заболевания пациентов составила 2 IQR (1–4) года. В процентном соотношении девочки преобладали над мальчиками — 68,4 и 31,6% соответственно.

Основные результаты исследования

При клиническом осмотре пациентов самой распространённой жалобой стала быстрая утомляемость (табл. 1). Мы провели всем пациентам тест 6-минутной

Таблица 1. Частота предъявляемых жалоб пациентов с ремиттирующим рассеянным склерозом с лёгкой инвалидизацией

Table 1. Frequency of complaints presented by patients with relapsing-relmitting multiple sclerosis with mild disability

Жалоба	Пациенты, предъявляющие жалобу, %
Нарушение баланса	18,4
Нарушение чувствительности	2,6
Головные боли	13,2
Нарушение походки	5,3
Повышенная утомляемость	47,4
Слабость	7,9

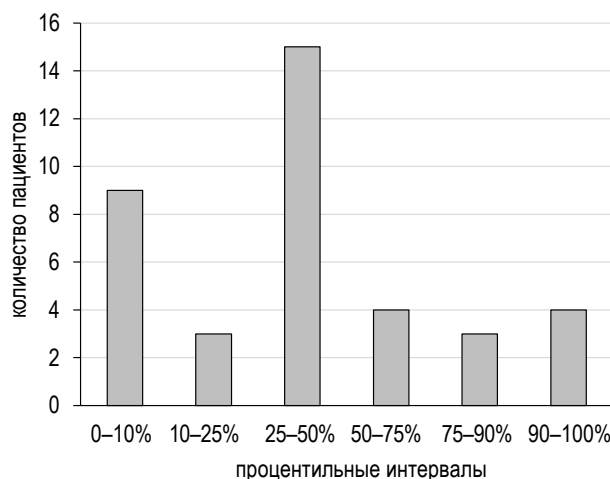


Рис. 2. График распределения результатов теста 6-минутной ходьбы у детей с рассеянным склерозом по процентильным интервалам нормативных значений.

Fig. 2. The graph of the distribution of the results of the 6-minute walking test in children with multiple sclerosis by percentile intervals of standard values.

ходьбы, где оценивали пройденное ими расстояние за 6 мин. В детской популяции нет формул для расчётов должного пройденного расстояния, так как результаты очень зависят от возраста, пола и этнической принадлежности. Поэтому для сравнения использовали популяционное исследование среди здоровых детей на территории РФ, в котором даны значения по процентильным в зависимости от пола и возраста [18]. Полученные результаты каждого пациента сравнили с этими значениями и выявили, что у большинства наших пациентов значение теста соответствовало средним значениям в данной возрастной категории (рис. 2).

Далее произвели оценку данных инструментального анализа походки. Из-за возможных проблем перекрёстных помех в четырехглавой мышце и переднебольшеберцовой мы не могли достоверно судить о наличии изменения кривой пЭМГ-активности, поэтому оценивали только икроножные мышцы. У 17 (44,74%) пациентов наблюдали изменения формы графика пЭМГ-активности и разделили их на несколько вариантов.

В первом варианте фиксировали появление второго пика активности, смещённого в сторону конца цикла шага с предшествующим ему кратковременным неполным снижением активности. Величина амплитуды второго пика различалась у пациентов. В нашем исследовании ограничили только изучением встречаемости второго пика у данной категории пациентов, что составило 26,32% случаев от всех обследуемых больных (10 пациентов; рис. 3).

Во втором варианте отметили преждевременную ЭМГ-активность (раннее включение ЭМГ-активности). Подобное наблюдали у 7 (18,42%) пациентов (рис. 4).

При МРТ-диагностике в 44,7% случаев наблюдали ухудшение МРТ-картины по сравнению с данными предыдущей госпитализации в виде появления новых

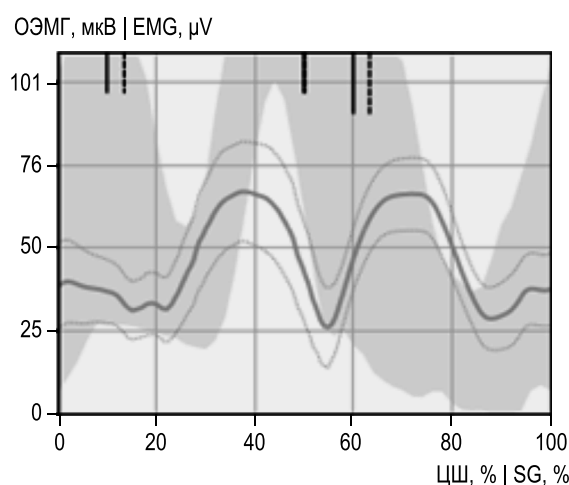


Рис. 3. Изменённый график амплитуды огибающей электромиографии икроножной мышцы в цикле шага с продолжающейся активацией и появлением второго пика.

ОЭМГ — огибающая электромиография; ЦШ — цикл шага.

Fig. 3. Modified amplitude graph of the gastrocnemius muscle's electromyography envelope during the gait cycle, showing continued or prolonged activation and the appearance of a second peak.

EMG — electromyography envelope; SG — step cycle.

очагов (17 пациентов), в 55,3% случаев МРТ-картина оставалась стабильной (21 пациент). Все пациенты в межгоспитальный период получали базисную медикаментозную терапию, назначенную врачом-неврологом. Средний срок межгоспитального периода составил 9 мес.

Дополнительные результаты исследования

Нежелательные явления

В ходе исследования не наблюдали нежелательных явлений.

ОБСУЖДЕНИЕ

Резюме основного результата исследования

В ходе проведённого дополнительного диагностического исследования выявили изменения функции походки у детей с диагнозом РС. Они связаны с изменением расстояния, которое пациенты проходили за 6 мин, и ЭМГ-активностью мышц, в частности икроножной мышцы, и составляли 44,74% общего числа обследованных.

Обсуждение основного результата исследования

Результаты 6-минутного теста показали, что у большинства детей с РС с низкой степенью инвалидизации пройденное расстояние соответствовало возрастной норме, что говорит о сохранении функции толерантности к физической нагрузке.

Выявленная двухпиковая форма графика ЭМГ-активности икроножной мышцы у детей с РС

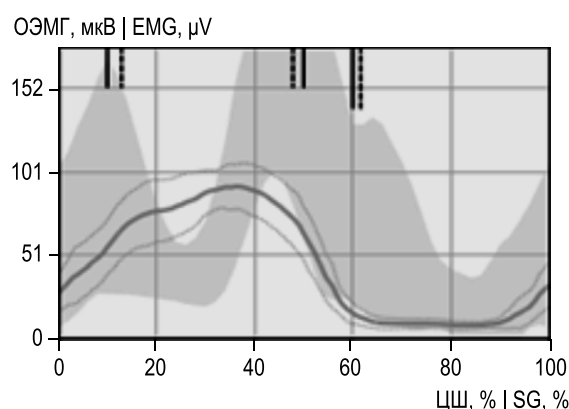


Рис. 4. Изменённый график амплитуды огибающей электромиографии икроножной мышцы в цикле шага с преждевременной активацией.

ОЭМГ — огибающая электромиография; ЦШ — цикл шага.

Fig. 4. Modified amplitude graph of the gastrocnemius muscle's electromyography envelope during the gait cycle, showing premature activation.

EMG — electromyography envelope; SG — step cycle.

не описывалась в ранее изученной литературе. Варианты ЭМГ, характеризующиеся преждевременной ЭМГ-активностью (ранним включением ЭМГ-активности), описывались ранее у взрослых, однако такой график ЭМГ-активности кардинально отличается от описанного нами двухпикового графика с продолжающейся активацией мышцы в первом варианте [15]. Основное отличие двух паттернов заключается в том, что, по данным этого исследования, пик ЭМГ-активности представляет собой активацию мышцы до её нормального включения, мы регистрировали продолжающуюся активацию икроножной мышцы в фазе переноса, которая необходима для обеспечения биомеханически корректного шага.

Такая продолжающаяся активация икроножной мышцы сказывается на биомеханике движений в голеностопном суставе, так как накладывается на нормальную активацию мышц-антагонистов в следующем этапе цикла шага. Явление совместного включения мышц-антагонистов называется коконтракцией. В норме она приводит к увеличению стабильности сустава, что способствует точности движений конечностей и сопровождается повышением энергетических затрат. Даже если предположить, что наблюдаемое нами увеличение жёсткости сустава в фазе опоры может быть обусловлено нарушением мышечного контроля, то в фазе переноса ноги такое явление не несёт даже компенсаторной цели, но патологически влияет на биомеханику походки. В то же время качественная оценка жёсткости суставов представляет трудности при использовании как экспериментальных, так и вычислительных методов. В отличие от этого, количественное измерение совместного сокращения мышц с помощью индекса совместного сокращения (CCI), основанного на данных ЭМГ, является более простым и может служить альтернативным методом для оценки стабильности суставов.

Существует несколько разных вариантов подсчёта индекса коконтракции. Наиболее часто используются индексы CCI_1 (K.S. Rudolph и соавт., 2000) и CCI_2 (K. Falconer и D.A. Winter, 1985) [19, 20].

CCI_1 измеряет активацию мышц-антагонистов не только относительно общей активации мышц-агонистов и мышц-антагонистов, но и активации мышц-агонистов, тогда как CCI_2 измеряет активацию мышц-антагонистов относительно только общей активации мышц. На основании работы G. Li, где сравнивались эти индексы между собой и корреляцией с жесткостью суставов, CCI_2 показал наилучшие результаты, поэтому для оценки вклада коконтракции в патологическую жесткость сустава был выбран этот индекс [21].

Формула CCI_2 :

$$CCI_2(t) = \frac{2 \times \text{Input}_L(t)}{\text{Input}_L(t) + \text{Input}_H(t)},$$

где Input_L — минимальная амплитуда ЭМГ, Input_H — максимальная амплитуда ЭМГ.

Для сравнения с показателями походки здоровых людей мы набрали группу сравнения из 9 условно здоровых детей, соотнесённых по возрастному и половому признаку с детьми, продемонстрировавшими вариант патологической походки со вторым пиком активности икроножной мышцы. В исследуемой группе средний индекс совместного сокращения был равен 64,2, в группе сравнения аналогичный показатель был равен 45,9. Поскольку цикл шага включает принципиально разную

и сложную работу мышц, мы посчитали индекс совместного сокращения отдельно для фазы опоры и переноса. В группе исследования индексы равны 69,4 и 55,7 соответственно, в группе сравнения — 52,9 и 35,7 соответственно. При проведении сравнительного анализа выявили, что средний индекс совместного сокращения всего цикла шага у детей с ремиттирующим течением РС больше на 40%, чем у здоровых детей. В фазе опоры эти индексы различались на 31%, а в фазе переноса — на 59%, что ещё раз показывает большее влияние данного патологического паттерна именно на фазу переноса (рис. 5).

Нами сделано предположение, что причина такого изменения активности икроножной мышцы связана с демиелинизацией кортикоспинального тракта, отвечающего за её иннервацию. Этот факт подтверждает смещение частотного спектра при этом паттерне в сторону более низких частот. Объяснением этого факта является изменённое свойство передачи импульса при демиелинизации волокна. Одно из свойств нервного волокна — это неспособность передавать импульс после одиночного стимула в течение определённого периода (рефрактерный период) [22]. Демиелинизированное нервное волокно теряет свойство передачи быстрых последовательных импульсов в связи с повышением рефрактерного периода после передачи одиночного импульса. Кроме того, наблюдается и более медленная передача сигнала и на более низких частотах. Клинически это может проявляться в изменении ощущения вибрации.

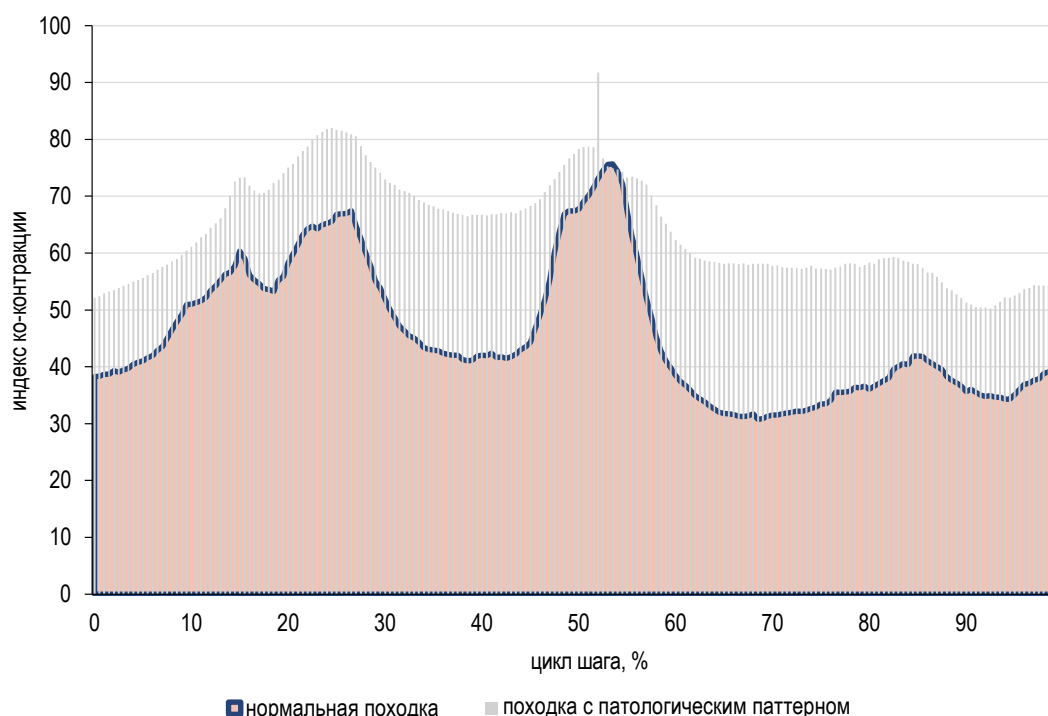


Рис. 5. График сравнения индекса коконтракции в цикле шага в норме и у пациентов с нарушением активности при рассеянном склерозе.

Fig. 5. Comparison graph of the Co-Contraction Index during the gait cycle in healthy individuals and patients with MS-related muscle activation disturbances.

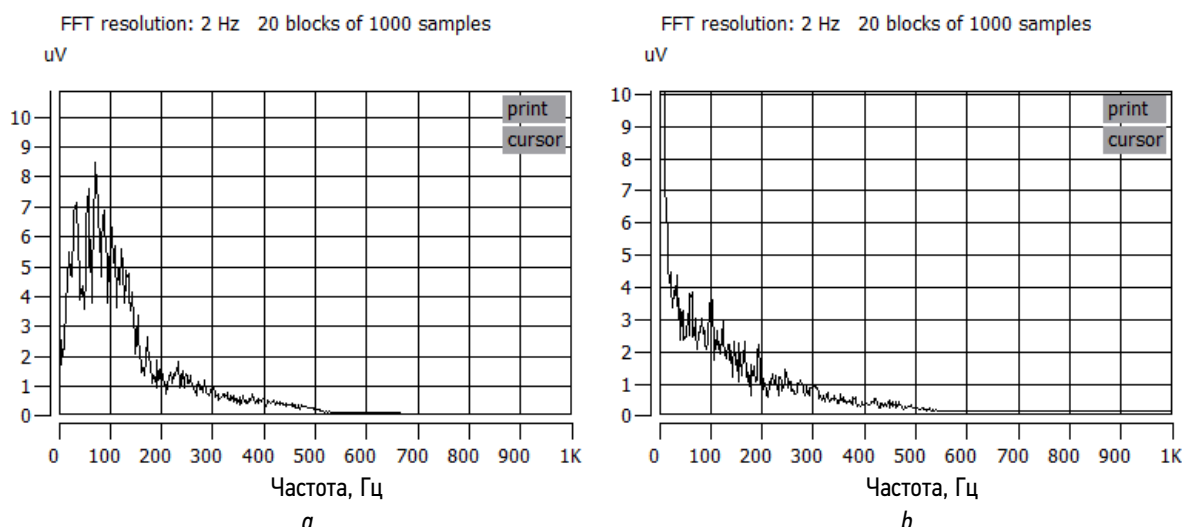


Рис. 6. График частотного спектра активности икроножной мышцы в норме (а), при изменённом паттерне электромиографической активности с продолжающейся активацией у детей с рассеянным склерозом (б).

Fig. 6. Frequency spectrum graph of gastrocnemius muscle activity under normal conditions (a) and in the altered EMG activity pattern with continued activation in children with multiple sclerosis (b).

В результате мы наблюдаем значительное изменение графика активности икроножной мышцы при пЭМГ в виде кривой с двойным пиком и смещение частотного спектра (рис. 6), что может быть индикатором степени демиелинизации.

При втором варианте изменения графика активности икроножной мышцы не наблюдали смещения частотного спектра, что говорит о другом механизме развития данного паттерна, связанного в большей степени с компенсаторными процессами изменённой биомеханики походки. Это происходит при нарушении стабильности, которая в свою очередь связана с аксональными повреждениями кортикоспинального тракта [23].

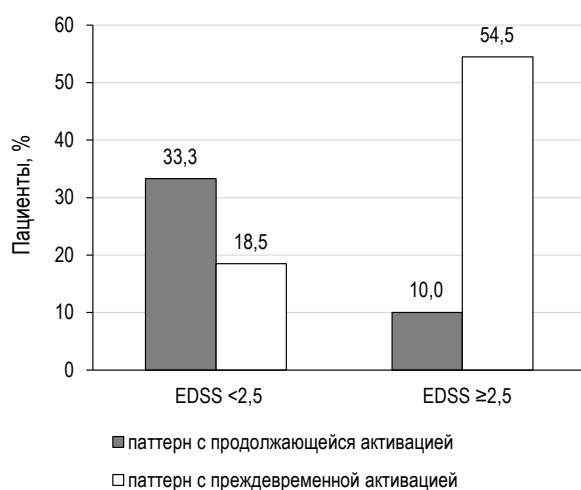


Рис. 7. Диаграмма процентного распределения патологического паттерна в икроножной мышце среди детей с рассеянным склерозом.

Fig. 7. Diagram showing the percentage distribution of the pathological pattern in the gastrocnemius muscle among children with different disability score multiple sclerosis.

В обоих вариантах такая чрезмерная работа мышц приводит к увеличению энергозатрат во время ходьбы, увеличению усталости и снижению толерантности к физической нагрузке.

Кроме того, мы провели оценку связи наблюдаемых изменений ЭМГ-активности в икроножных мышцах в виде кривой с двойным пиком и ухудшения МРТ-картины. Анализ проводили при помощи критерия хи-квадрат Пирсона в ходе анализа таблиц сопряжённости с поправкой Йетса. У 5 детей наблюдали совпадение в виде диагностики изменённого паттерна в икроножной мышце и ухудшения МРТ-картины в виде появления новых очагов за последний год. У 5 пациентов появление паттерна диагностировали при стабильной МРТ-картине. У 9 пациентов пЭМГ икроножных мышц не выявила изменений, при этом на МРТ зафиксировано появление новых очагов, а у 12 пациентов не было изменений в икроножной мышце и на МРТ. В результате расчётов получаем $p > 0,05$, что говорит об отсутствии взаимосвязи появления патологического паттерна в икроножной мышце и отрицательной динамики при проведении МРТ головного и спинного мозга.

У всех пациентов, кто жаловался на слабость, обнаружен патологический паттерн в икроножной мышце.

Кроме того, мы заметили одну связь среди пациентов, не входивших в группу включения. У них степень инвалидности была больше, они имели вторично-прогрессирующее и первично-прогрессирующее течение заболевания. В процентном соотношении проявление первого и второго варианта патологического паттерна в икроножной мышце различалось. В исследуемой группе детей с низкой инвалидизацией встречаемость паттерна с продолжающейся активацией превалировала над встречаемостью паттерна с преждевременной активацией — 33,3 против 18,5%. В отличие от этого, в группе детей с инвалидизацией

по шкале EDSS >2,5 баллов превалировал вариант паттерна с продолжающейся активацией — 54,5 против 10% (рис. 7).

Ограничения исследования

Выборку исследования составили всего 38 пациентов. Пациенты ходили с самостоятельно выбранной скоростью, данные пЭМГ не нормировались к максимальному изометрическому сокращению. Из-за перекрёстных помех мы оценивали только изменение активности в икроножных мышцах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В исследовании пациентов с диагнозом «РС, ремиттирующее течение с низкой степенью инвалидизации» выявлены нарушения походки. У 44,74% детей при инструментальном анализе походки с применением пЭМГ зарегистрировано изменение работы икроножной мышцы, проявляющееся в двух вариантах. Первый вариант — продолжающаяся активация мышцы в фазы отдыха в течение цикла шага, второй вариант — раннее включение мышц. Вариант графика ЭМГ-активности икроножной мышцы с продолжающейся активацией ранее не описывался в детской популяции с РС. Мы связываем этот паттерн с процессами демиелинизации ЦНС, замедлением проводимости по нервным волокнам, а также параллельным процессом ремиелинизации, в результате чего могут наблюдаться нарушения синхронности проведения импульсов по нервным волокнам. Процессы восстановления повреждённых оболочек, а также компенсаторные механизмы активно происходят у пациентов на ранней стадии заболевания и обуславливают низкий уровень инвалидизации. Связи с обострением заболевания в момент диагностики не выявлено, как и не подтвердилась гипотеза о связи с ухудшением МРТ-картины за предшествующий год. При клиническом осмотре данной группы пациентов явных изменений походки не было выявлено, что соответствует симптому расщепления, характерному для пациентов с РС, поэтому данная диагностическая процедура служит удобным и эффективным методом выявления скрытой патологии. Такое детальное изучение двигательного статуса пациентов даёт преимущество в подборе методов физической реабилитации и составлении индивидуального плана лечения. Выявленные изменения могут служить маркерами подбора методов реабилитации и оценки эффективности лечения. Из-за ограничений исследование данного феномена требует дальнейшего изучения.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Вклад авторов. М.А. Боровик — обзор литературы, отбор и осмотр пациентов, сбор и анализ литературных источников, написание текста и редактирование статьи; И.О. Ведерников — проведение процедуры инструментального

исследования походки, подготовка и написание текста статьи; О.А. Лайшева — научный руководитель исследования; Э.Ю. Волкова — ведение пациентов по неврологическому профилю, выставление диагноза; Т.С. Ковальчук — курация работы. Все авторы одобрили рукопись (версию для публикации), 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. Проведение исследования одобрено локальным этическим комитетом РДКБ — филиала РНИМУ им. Н.И. Пирогова (Пироговский университет). Выписка из протокола № 25 от 26.11.2024. Все участники исследования добровольно подписали форму информированного согласия до включения в исследование.

Источники финансирования. Отсутствуют.

Раскрытие интересов. Авторы заявляют об отсутствии отношений, деятельности и интересов за последние три года, связанных с третьими лицами (коммерческими и некоммерческими), интересы которых могут быть затронуты содержанием статьи.

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

Доступ к данным. Редакционная политика в отношении совместного использования данных к настоящей работе не применима, новые данные не собирали и не создавали.

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

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 INFORMATION

Author contributions. M.A. Borovik — literature review, selection and examination of patients, collection and analysis of literary sources, writing and editing of the article; I.O. Vedernikov — carrying out the procedure of instrumental gait research, preparation and writing of the text of the article; O.A. Laysheva — scientific supervisor of the study; E.Yu. Volkova — patient management neurological profile, diagnosis; T.S. Kovalchuk — curation of the work. 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.

Ethics approval. The study was approved by the local ethics committee of the Russian Children's Clinical Hospital — a branch of the Pirogov Russian National Research Medical University (Pirogov University). Extract from protocol N. 25 dated 11/26/2024. All study participants voluntarily signed an informed consent form before inclusion in the study.

Funding sources. No funding.

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

Statement of originality. In creating this work, the authors did not use previously published information (text, illustrations, data).

Data availability statement. The editorial policy regarding data sharing does not apply to this work, and no new data was collected or created.

Generative AI. Generative AI technologies were not used for this article creation.

Provenance and peer-review. This paper was submitted to the journal on an unsolicited basis and reviewed according to the usual procedure. Two external reviewers, a member of the editorial board, and the scientific editor of the publication participated in the review.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ | REFERENCES

1. Lubetzki C, Stankoff B. Demyelination in multiple sclerosis. *Handb Clin Neurol.* 2014;122:89–99. doi: 10.1016/B978-0-444-52001-2.00004-2
2. Gusev EI, Kononova AN, Geht AB. *Neurology.* National Leadership. Moscow: GEOTAR-Media; 2018. 688 p. (In Russ.)
3. Halliday AM, McDonald WI. *Pathophysiology of demyelinating disease.* *British medical bulletin.* 1977;33(1):21–27.
4. Ritchie JM. *Pathophysiology of conduction in demyelinated nerve fibers. Myelin.* Boston: Springer US; 1984.
5. Domres NV. The features of the functional state of muscle fibers in patients with multiple sclerosis with spasticity according to the results of electroneuromyography. *The Bulletin of Contemporary Clinical Medicine.* 2020;13(5):46–56. doi: 10.20969/VSKM.2020.13
6. Dorokhov AD, Shkilnyuk GG, Tsvetkova TL, Stoliarov ID. Features of walking disorders in multiple sclerosis. *Practical Medicine.* 2019;17(7):28–32. doi: 10.32000/2072-1757-2019-7-28-32
7. Eken MM, Richards R, Beckerman H, et al. Quantifying muscle fatigue during walking in people with multiple sclerosis. *Clinical Biomechanics.* 2020;72:94–101. doi: 10.1016/j.clinbiomech.2019.11.020
8. Molina-Rueda F, Fernández-Vázquez D, Navarro-López V, et al. Muscle coactivation index during walking in people with multiple sclerosis with mild disability, a cross-sectional study. *Diagnostics.* 2023;13(13):2169. doi: 10.3390/diagnostics13132169
9. Molina-Rueda F, Fernández-Vázquez D, Navarro-López V, et al. The timing of kinematic and kinetic parameters during gait cycle as a marker of early gait deterioration in multiple sclerosis subjects with mild disability. *Journal of Clinical Medicine.* 2022;11(7):1892. doi: 10.3390/jcm11071892
10. Berg-Hansen P, Moen SM, Austeng A, et al. Sensor-based gait analyses of the six-minute walk test identify qualitative improvement in gait parameters of people with multiple sclerosis after rehabilitation. *J Neurol.* 2022;269:3723–3734. doi: 10.1007/s00415-022-10998-z
11. Coca-Tapia M, Cuesta-Gómez A, Molina-Rueda F, Carratalá-Tejada M. Gait pattern in people with multiple sclerosis: a systematic review. *Diagnostics.* 2021;11(4):584. doi: 10.3390/diagnostics11040584
12. Kotov SV, Petrushanskaya KA, Lizhdvoj VJ, et al. Clinico-physiological foundation of application of exoskeleton “exoatlet” during walking of patients with disseminated sclerosis. *Russian Journal of Biomechanics.* 2020;24(2):148–166. doi: 10.15593/rzhbiomeh/2020.2.03
13. Dorokhov AD, Ivashkova EV, Ilves AG, et al. Assessment of biomechanical parameters of feet in patients with multiple sclerosis during walking. *Russian neurological journal.* 2023;28(4):35–42. doi: 10.30629/2658-7947-2023-28-4-35-42
14. Cofré Lizama LE, Strik M, Van der Walt A, et al. Gait stability reflects motor tracts damage at early stages of multiple sclerosis. *Multiple sclerosis journal.* 2022;28(11):1773–1782. doi: 10.1177/13524585221094464
15. Kalron A, Frid L, Menascu S. Gait characteristics in adolescents with multiple sclerosis. *Pediatric Neurology.* 2017;68:73–76. doi: 10.1016/j.pediatrneurol.2016.11.004
16. Ministry of Health of the Russian Federation. *Clinical recommendations, multiple sclerosis in children.* 2022. Available: http://disuria.ru/_ld/12/1226_kr22G35p0MZ.pdf (In Russ.)
17. Winter DA, Yack HJ. EMG profiles during normal human walking: stride-to-stride and inter-subject variability. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol.* 1987;67(5):402–411. doi: 10.1016/0013-4694(87)90003-4
18. Bushueva EV, Gerasimova LI, Sharapova OV, et al. 6-minute walking test indicators in healthy children and adolescents. *Practical medicine.* 2023;21(1):80–86. doi: 10.32000/2072-1757-2023-1-80-86
19. Rudolph KS, Axe MJ, Snyder-Mackler L. Dynamic stability after ACL injury: who can hop? *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* 2000;8(5):262–9. doi: 10.1007/s001670000130
20. Falconer K, Winter DA. Quantitative assessment of co-contraction at the ankle joint in walking. *Electromyogr Clin Neurophysiol.* 1985;25(2–3):135–49.
21. Li G, Shourijeh MS, Ao D, et al. How well do commonly used co-contraction indices approximate lower limb joint stiffness trends during gait for individuals post-stroke? *Front Bioeng Biotechnol.* 2021;8:588908. doi: 10.3389/fbioe.2020.588908
22. Kiernan MC, Kaji R. Physiology and pathophysiology of myelinated nerve fibers. *Handbook of clinical neurology.* 2013;115:43–53.
23. Cofré Lizama LE, Strik M, Van der Walt A, et al. Gait stability reflects motor tracts damage at early stages of multiple sclerosis. *Mult Scler.* 2022;28(11):1773–1782. doi: 10.1177/13524585221094464

ОБ АВТОРАХ

* **Боровик Маргарита Александровна;**

адрес: Россия, Москва, 119571, Ленинский проспект, д. 117;

ORCID: 0009-0004-9663-4805;

eLibrary SPIN: 6307-8201;

e-mail: a1180@rambler.ru

AUTHORS' INFO

* **Margarita A. Borovik;**

address: 117 Leninsky ave, Moscow, Russia, 119571;

ORCID: 0009-0004-9663-4805;

eLibrary SPIN: 6307-8201;

e-mail: a1180@rambler.ru

Ведерников Игорь Олегович;

ORCID: 0009-0006-1327-2525;

eLibrary SPIN: 5047-2594;

e-mail: pulmar@bk.ru

Лайшева Ольга Арленовна, д-р мед. наук, профессор;

ORCID: 0000-0002-8084-1277;

eLibrary SPIN: 8188-2819;

e-mail: olgalaisheva@mail.ru

Волкова Эльвира Юрьевна;

ORCID: 0000-0001-5646-3651;

e-mail: ellivolk@yandex.ru

Ковальчук Тимофей Сергеевич;

ORCID: 0000-0002-9870-4596;

e-mail: doctor@tim-kovalchuk.ru

Igor O. Vedernikov;

ORCID: 0009-0006-1327-2525;

eLibrary SPIN: 5047-2594;

e-mail: pulmar@bk.ru

Olga A. Laysheva, MD, Dr. Sci. (Medicine), Professor;

ORCID: 0000-0002-8084-1277;

eLibrary SPIN: 8188-2819;

e-mail: olgalaisheva@mail.ru

Elvira Yu. Volkova;

ORCID: 0000-0001-5646-3651;

e-mail: ellivolk@yandex.ru

Timofey S. Kovalchuk;

ORCID: 0000-0002-9870-4596;

e-mail: doctor@tim-kovalchuk.ru

*Автор, ответственный за переписку / Corresponding author