

## ОЦЕНКА БИОМЕХАНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СТОП У БОЛЬНЫХ РАССЕЯННЫМ СКЛЕРОЗОМ ВО ВРЕМЯ ХОДЬБЫ

Дорохов А.Д.<sup>1,3</sup>, Ивашкова Е.В.<sup>1</sup>, Ильвес А.Г.<sup>1</sup>, Минеев К.К.<sup>1</sup>, Негореева И.Г.<sup>1</sup>, Петров А.М.<sup>1</sup>, Прахова Л.Н.<sup>1</sup>, Столяров И.Д.<sup>1</sup>, Шкильнюк Г.Г.<sup>1</sup>, Тартаковский В.Н.<sup>2</sup>, Цветкова Т.Л.<sup>2</sup>, Зубарев В.А.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>ФГБУН Институт мозга человека им. Н.П. Бехтерева РАН, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup>ООО «Новел СПб», Санкт-Петербург, Россия

<sup>3</sup>СПб ГУП «Пассажиравтотранс», медико-санитарная часть №70, Санкт-Петербург, Россия

### Резюме

**Обоснование.** При рассеянном склерозе (РС) отмечаются нарушения ходьбы и равновесия, изменены кинематика мышц стопы и стереотипы ходьбы.

**Цель исследования.** Провести оценку биомеханических параметров стоп у больных РС с различной тяжестью заболевания во время ходьбы.

**Материал и методы.** Анализ данных 102 пациентов с ремиттирующим РС проводился в двух группах, разделенных в зависимости от балла по расширенной шкале инвалидизации EDSS. Распределение плантарного давления измерялось на педографической платформе *emed, novel gmbh*, Мюнхен, Германия, с использованием протокола, при котором прохождение по платформе начинается с первого шага.

**Результаты.** Больные РС при ходьбе менее нагружают пятку, область центральных плюсневых костей и больше нагружают пальцы. Установлены отличия для коэффициента распластанности (отношение ширины к длине стопы), динамическая ширина стопы у пациентов с баллом по шкале EDSS  $\geq 4$  значимо меньше как в подъеме, так и в среднем отделе стопы, и в самом узком месте, что приводит к уменьшению площади контакта.

Показано, что мобильные или передвигающиеся без посторонней помощи пациенты чаще имеют «полую» стопу по сравнению с больными РС с незначительными нарушениями. Нагрузка медиальной части стопы больше, чем латеральной, что свидетельствует о преобладании вальгусной стопы. Индекс пронации-супинации значимо больше у больных с умеренными нарушениями в заключительной фазе отрыва пальцев от опоры.

**Заключение.** Оценка деформации стоп на основе измерения биомеханических параметров распределения плантарного давления дает возможность планировать лечебную и реабилитационную тактику при РС.

**Ключевые слова:** рассеянный склероз; нарушения ходьбы; педографическое исследование; плантарное давление; биомеханика стоп.

**Для цитирования:** Дорохов А.Д., Ивашкова Е.В., Ильвес А.Г., Минеев К.К., Негореева И.Г., Петров А.М., Прахова Л.Н., Столяров И.Д., Шкильнюк Г.Г., Тартаковский В.Н., Цветкова Т.Л., Зубарев В.А. Оценка биомеханических параметров стоп у больных рассеянным склерозом во время ходьбы. *Российский неврологический журнал*. 2023;28(4):35–42. DOI 10.30629/2658-7947-2023-28-4-35-42

**Автор для корреспонденции:** Дорохов Артемий Дмитриевич, e-mail: dorohovart@yandex.ru

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Финансирование.** Исследование не имело спонсорской поддержки.

### Информация об авторах

Дорохов А.Д., e-mail: dorohovart@yandex.ru

Ивашкова Е.В., <https://orcid.org/0000-0002-0201-0136>; e-mail: ivashkova@ihb.spb.ru

Ильвес А.Г., <https://orcid.org/0000-0002-9822-5982>; e-mail: ailves@ihb.spb.ru

Минеев К.К., <https://orcid.org/0000-0002-7183-9116>; e-mail: mineev@ihb.spb.ru

Негореева И.Г., <https://orcid.org/0000-0002-1497-7109>; e-mail: nip@ihb.spb.ru

Петров А.М., <https://orcid.org/0000-0001-9648-5492>; e-mail: apetrov@ihb.spb.ru

Прахова Л.Н., <https://orcid.org/0000-0002-4776-2999>; e-mail: l.n.prakhova@hotmail.com

Столяров И.Д., <https://orcid.org/0000-0001-8154-9107>; e-mail: sid@ihb.spb.ru

Шкильнюк Г.Г., <https://orcid.org/0000-0001-7175-668X>; e-mail: galinakima@mail.ru

Тартаковский В.Н., e-mail: miamy2014@google.com

Цветкова Т.Л., <https://orcid.org/0000-0001-6684-0422>; e-mail: tatianatsvetkova@inbox.ru

Зубарев В.А., e-mail: vadim\_zubarev@mail.ru

## ASSESSMENT OF BIOMECHANICAL PARAMETERS OF FEET IN PATIENTS WITH MULTIPLE SCLEROSIS DURING WALKING

Dorokhov A.D.<sup>1,3</sup>, Ivashkova E.V.<sup>1</sup>, Ilves A.G.<sup>1</sup>, Mineev K.K.<sup>1</sup>, Negoreeva I.G.<sup>1</sup>, Petrov A.M.<sup>1</sup>, Prakhova L.N.<sup>1</sup>, Stolyarov I.D.<sup>1</sup>, Shkilnyuk G.G.<sup>1</sup>, Tartakovsky V.N.<sup>2</sup>, Tsvetkova T.L.<sup>2</sup>, Zubarev V.A.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>N.P. Bechtereva Institute of Human Brain of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia

<sup>2</sup>Novel SPb LLC, St. Petersburg, Russia

<sup>3</sup>State Unitary Enterprise “Passagiravtotrans” Medical and sanitary unit No. 70, St. Petersburg, Russia

### Abstract

**Rationale.** Walking and balance disorders, modified foot muscles kinematics and walking stereotypes are typical for the patients with Multiple Sclerosis (MS).

**Objective.** To assess the biomechanical parameters of the feet in MS patients with different neurological status during walking.

**Material and methods.** Data analysis of 102 patients with relapsing-remitting MS was carried out for two groups depending on the value of the Expanded Disability Status Scale (EDSS). Plantar pressure distribution was measured on with the pedographic platform emed, novel gmbh, Munich, Germany, using a "first step" protocol.

**Results and conclusion.** Loading of the heel, the area of central metatarsal heads is decreased and loading of the toes is increased during walking in MS patients. Differences were found for the spreading coefficient (the ratio of the width to the length of the foot), the dynamic width of the foot in patients with an EDSS  $\geq 4$  is significantly less in the instep, in the middle and in the narrowest parts of the foot, which leads to the decrease of the contact area. It has been shown that patients with MS who are mobile or walk without assistance are more likely to have pes cavus foot compared to MS patients with minor impairments. The load of the medial side of the foot is greater than the lateral side, which indicates the predominance of the valgus foot. The pronation-supination index is significantly higher in the patients with moderate impairments in toe-off phase. Evaluation of foot deformity based on the measurement of biomechanical parameters of plantar pressure distribution makes it possible to plan the treatment and rehabilitation tactics in MS patients.

**Key words:** multiple sclerosis; walking disorders; pedographic research; plantar pressure; foot biomechanics.

**For citation:** Dorokhov A.D., Ivashkova E.V., Ilves A.G., Mineev K.K., Negoreeva I.G., Petrov A.M., Prakhova L.N., Stolyarov I.D., Shkilnyuk G.G., Tartakovskiy V.N., Tsvetkova T.L., Zubarev V.A. Assessment of biomechanical parameters of feet in patients with multiple sclerosis during walking. *Russian Neurological Journal (Rossijskij Nevrologicheskiy Zhurnal)*. 2023;28(4):35–42. (In Russian). DOI 10.30629/2658-7947-2023-28-4-35-42

**Corresponding author:** Dorokhov Artemiy Dmitrievich, e-mail: dorohovart@yandex.ru

**Conflict of interest.** The authors declare no conflict of interest.

**Acknowledgements.** The study had no sponsorship

#### Information about the authors

Dorokhov A.D., e-mail: dorohovart@yandex.ru

Ivashkova E.V., <https://orcid.org/0000-0002-0201-0136>; e-mail: ivashkova@ihb.spb.ru

Ilves A.G., <https://orcid.org/0000-0002-9822-5982>; e-mail: ailves@ihb.spb.ru

Mineev K.K., <https://orcid.org/0000-0002-7183-9116>; e-mail: mineev@ihb.spb.ru

Negoreeva I.G., <https://orcid.org/0000-0002-1497-7109>; e-mail: nip@ihb.spb.ru

Petrov A.M., <https://orcid.org/0000-0001-9648-5492>; e-mail: apetrov@ihb.spb.ru

Prakhova L.N., <https://orcid.org/0000-0002-4776-2999>; e-mail: l.n.prakhova@hotmail.com

Stolyarov I.D., <https://orcid.org/0000-0001-8154-9107>; e-mail: sid@ihb.spb.ru

Shkilnyuk G.G., <https://orcid.org/0000-0001-7175-668X>; e-mail: galinakima@mail.ru

Tartakovskiy V.N., e-mail: miamy2014@google.com

Tsvetkova T.L., <https://orcid.org/0000-0001-6684-0422>; e-mail: tatianatsvetkova@inbox.ru

Zubarev V.A., e-mail: vadim\_zubarev@mail.ru

Received 20.10.2022

Accepted 06.06.2023

**Сокращения:** ИДВ — интеграл давление-время; ИМТ — индекс массы тела; ИОЦД — индекс отклонения центра давления; ИПС — индекс пронации-супинации; КГ — контрольная группа; КИ — корональный индекс; МКИ — модифицированный корональный индекс; МС — мозжечковая система; ПС — пирамидная система; РС — рассеянный склероз; СКО — среднееквадратическое отклонение; EDSS — Expanded Disability Status Scale.

**Введение.** Рассеянный склероз (РС) — дегенеративно-нейродегенеративное заболевание центральной нервной системы, которое поражает в основном лиц молодого возраста и почти с неизбежностью приводит на определенной стадии своего развития к инвалидизации [1]. Около 75% больных с РС имеют проблемы с ходьбой [2] и нарушением равновесия [3]. Нарушения ходьбы у больных с РС вызваны мышечной слабостью (приводящей к так называемой «свисающей» стопе), спастичностью, мозжечковой атаксией, сенситивной атаксией, утомляемостью [4]. При симптоме «свисающей» стопы из-за

пареза уменьшается дорсифлексия (тыльное сгибание) или разгибание голеностопного сустава во время ходьбы [5]. При этом из-за нарушения функции разгибания стопы не поднимается вверх и шлепает при ходьбе, что увеличивает риск падений. Нарушения, связанные с РС, усиливаются деформацией стопы, использованием неподходящей обуви, отсутствием ортопедических стелек или ортопедической обуви, когда требуется их ношение. Наиболее распространенные деформации — вальгусное отклонение большого пальца [6], молоткообразные и когтеобразные пальцы, уменьшающие площадь контакта, используемую для равновесия, что может приводить к горизонтальному движению стопы вокруг центра тяжести, увеличивать риск падения [7, 8] и уменьшать скорость ходьбы [9]. Кроме того, уменьшенная высота медиальной арки и нарушения в переднем отделе стопы (распластанность плюсневых костей, приводящая к исчезновению поперечной арки стопы) изменяют кинематику и активацию мышц стопы, а также стереотипы ходьбы [10, 11]. При РС часто встречается деформация в виде «плоской»

Таблица 1

## Данные пациентов с рассеянным склерозом по группам

|                          | Всего           | Группа 1       | Группа 2       |
|--------------------------|-----------------|----------------|----------------|
| Пациенты                 | 102 (31 М/71 Ж) | 50 (14 М/36 Ж) | 52 (17 М/35 Ж) |
| Возраст, полных лет      | 39 ± 10         | 37 ± 11        | 41 ± 8         |
| ИМТ, кг/м <sup>2</sup>   | 23 ± 4          | 23 ± 4         | 23 ± 4         |
| EDSS, балл               | 3,4 ± 1,3       | 2,4 ± 0,8      | 4,4 ± 0,7      |
| ПС                       | 2,1 ± 0,9       | 1,4 ± 0,7      | 2,7 ± 0,7      |
| МС                       | 2,0 ± 0,9       | 1,3 ± 0,6      | 2,7 ± 0,7      |
| Длительность заболевания | 8 ± 6           | 7 ± 7          | 8 ± 5          |

Примечание: ИМТ — индекс массы тела; ПС — пирамидная система; МС — мозжечковая система. Статистическая достоверность нарушений по шкалам ПС и МС и общий балл по шкале EDSS составляет  $p < 0,001$ .

Table 1

## Data of patients with multiple sclerosis by groups

|                         | Total           | Group 1        | Group 2        |
|-------------------------|-----------------|----------------|----------------|
| Patients                | 102 (31 M/71 F) | 50 (14 M/36 F) | 52 (17 M/35 F) |
| Age, years              | 39 ± 10         | 37 ± 11        | 41 ± 8         |
| BMI, kg/m <sup>2</sup>  | 23 ± 4          | 23 ± 4         | 23 ± 4         |
| EDSS, steps             | 3.4 ± 1.3       | 2.4 ± 0.8      | 4.4 ± 0.7      |
| PS                      | 2.1 ± 0.9       | 1.4 ± 0.7      | 2.7 ± 0.7      |
| CS                      | 2.0 ± 0.9       | 1.3 ± 0.6      | 2.7 ± 0.7      |
| Duration of the disease | 8 ± 6           | 7 ± 7          | 8 ± 5          |

Note: the following abbreviations are accepted: BMI — body mass index; PS — pyramidal system; CS — cerebellar system. The statistical reliability of violations on the PS and MS scales and the overall score on the EDSS scale is  $p < 0.001$ .

стопы [14], типичным являются деформации третьего-пятого пальцев [12]. В специальной литературе наблюдается недостаток работ по комплексному изучению проблем нарушения ходьбы у больных РС с точки зрения анализа биомеханики стоп [13, 14], что важно для разработки программы лечения и реабилитации.

**Цель исследования:** оценить биомеханические параметры стоп у больных РС с различным неврологическим статусом во время ходьбы, используя методику измерения распределения плантарного давления (педографию).

**Материал и методы.** В исследование включены 102 пациента (31 мужчина и 71 женщина) в возрасте  $39 \pm 10$  лет с диагнозом ремиттирующий РС согласно критериям Макдональда [15]. Неврологический статус оценивался по расширенной шкале инвалидизации Куртцке (Expanded Disability Status Scale, EDSS). Были обследованы пациенты с минимальными, незначительными и умеренными нарушениями, а также пациенты с полностью сохраненной мобильностью или способные пройти без вспомогательных средств — EDSS  $3,4 \pm 1,3$ . Анализ данных проводился для двух групп пациентов EDSS  $< 4$  (гр. 1) и EDSS  $\geq 4$  (гр. 2) и для контрольной группы (КГ) из 52 добровольцев аналогичного пациентам возраста без неврологических и ортопедических нарушений.

Данные по группам пациентов приведены в табл. 1.

Распределение плантарного давления измерялось на педографической платформе emed-AT 25 (novel, Мюнхен, Германия). Записывались 5 измерений при проходе по платформе левой и правой ногой. Использовался протокол «первого шага» (при котором

прохождение по платформе начинается с первого шага).

Проведенный нами ранее анализ нарушений ходьбы у больных РС ограничивался оценкой таких основных параметров, как пиковое давление, максимальная сила, площадь и время контакта, совместно с интегральными оценками силы и давления [16]. Основываясь на публикациях [14], в которых оценивается отклонение центра давления, сочли целесообразным включить в анализ также параметры, вычисляемые на основе разделения поверхности стопы на латеральную и медиальную части. Для каждого обследованного из выбранных групп вычислялись следующие параметры: угол отклонения большого пальца, арочный индекс, индекс центра давления, индекс отклонения центра давления, коронарный и модифицированный коронарный индексы, индексы пронации-супинации для 5 временных интервалов, а также геометрические параметры стопы (ширина стопы в подъеме и в самом узком месте, ширина в среднем отделе, длина стопы, коэффициенты распластанности и отношения ширины переднего отдела и пятки и др.). Для межгруппового сравнения использовался однофакторный дисперсионный анализ ANOVA ( $p < 0,001$ ).

Арочный индекс вычисляется как отношение загруженной площади среднего отдела к загруженной площади стопы без площади загруженных пальцев [17]. Индекс центра давления [18] — отношение площади контакта латеральной части к площади контакта медиальной части. Коронарный индекс (КИ) вычисляется как [19] разница интегралов давление-время (ИДВ) в медиальном и латеральном отделах стопы, нормированная к интегралу давление-время всей стопы:  $КИ = (ИДВ$

(медиальный средний отдел) + ИДВ (медиальный передний отдел с пальцами) – ИДВ (латеральный средний отдел) – ИДВ (латеральный передний отдел с пальцами) / ИДВ (стопа), и модифицированный корональный индекс (МКИ) вычисляется как [19] корональный индекс без учета интеграла давление-время для пятки:  $\text{МКИ} = \text{КИ} \times 100 / (100 - \text{ИДВ (пятка)})$ .

Для вычисления индекса пронации-супинации (ИПС) [20] проводятся касательные к медиальной (АМ-АЛ) и латеральной (ВМ-ВЛ) сторонам картины максимального давления, образуя продольный плантарный угол. Далее проводятся две перпендикулярные линии к медиальной касательной в области пальцев и пятки, описывая прямоугольник вокруг картины максимального давления. Длинная сторона прямоугольника определяет расстояние от пальцев до пятки.

ИПС определяется как частное от деления расстояния от линии ходьбы (линии центра давления) до медиальной касательной на расстояние между медиальной и латеральной касательными в заданной точке линии ходьбы.

Рассматриваются следующие точки линии ходьбы, соответствующие фазам контакта стопы с поверхностью.

1. Первая точка линии ходьбы — начальный контакт стопы.

$\text{ИПС (контакт стопы)} = \text{СМ} - \text{GB}$  (расстояние от линии ходьбы (линии центра давления) до медиальной касательной) /  $\text{СМ} - \text{CL}$  (расстояние между внутренней и внешней касательными)  $\times 100$  (%).

2. 1/3 расстояния от пятки до пальцев — ранняя фаза опоры (реакция на нагрузку).

$\text{ИПС (ранняя фаза опоры)} = \text{ВМ} - \text{BG}$  (расстояние от линии ходьбы (линии центра давления) до медиальной касательной) /  $\text{ВМ} - \text{BL}$  (расстояние между внутренней и внешней касательными)  $\times 100$  (%).

3. 1/2 расстояния от пятки до пальцев — середина опоры.

$\text{ИПС (середина опоры)} = \text{ЕМ} - \text{EG}$  (расстояние от линии ходьбы (линии центра давления) до медиальной касательной) /  $\text{ЕМ} - \text{EL}$  (расстояние между внутренней и внешней касательными)  $\times 100$  (%).

4. 2/3 расстояния от пятки до пальцев — поздняя фаза опоры.

$\text{ИПС (поздняя фаза опоры)} = \text{АМ} - \text{AG}$  (расстояние от линии ходьбы (линии центра давления) до медиальной касательной) /  $\text{АМ} - \text{AL}$  (расстояние между внутренней и внешней касательными)  $\times 100$  (%).

5. Последняя точка линии ходьбы — отрыв пальцев.

$\text{ИПС (отрыв пальцев)} = \text{DM} - \text{GE}$  (расстояние от линии ходьбы (линии центра давления) до медиальной касательной) /  $\text{DM} - \text{DL}$  (расстояние между внутренней и внешней касательными)  $\times 100$  (%).

На рис. 1 (см. 3-ю стр. обложки) приведены схематическое (а) и реальное представление (б) описанного построения.

На рис. 1 (б) цветом обозначены области давления ( $\text{кг/см}^2$ ): черный < 0,29, синий — 0,3–0,59,

голубой — 0,6–0,99, зеленый — 1,0–1,49, желтый — 1,5–2,19, красный — 2,2–2,99, фиолетовый > 3,0

Индекс отклонения центра давления (ИОЦД) измеряет отклонение линии ходьбы от прямой, соединяющей начало и конец линии ходьбы [14, 21]. На рис. 2 (см. 3-ю стр. обложки) показано схематическое представление вычисления ИОЦД.

Индекс отклонения центра давления вычисляется как:  $\text{ИОЦД} = \text{АС} - \text{AG}$  (расстояние от линии ходьбы (линии центра давления) до прямой, соединяющей начало и конец «линии ходьбы») /  $\text{АМ} - \text{AL}$  (расстояние между внутренней и внешней касательными)  $\times 100$ %.

Проведение исследования одобрено локальным комитетом по этике ИМЧ РАН, все пациенты подписали информированное согласие на участие в исследовании.

**Результаты.** На рис. 3 (см. 3-ю стр. обложки) приведены усредненные картинки максимального давления для КГ, гр.1 и гр. 2.

Ранее [16] нами отмечено, что больные РС в целом менее нагружают пятку, область центральных плюсневых костей и пальцы.

В гр. 2 по сравнению с гр. 1:

- уменьшена нагрузка на пятку; значимая разница в интегралах давление-время и сила-время объясняется значимо большим временем контакта в области пятки;
- уменьшена нагрузка в среднем отделе за счет уменьшения площади контакта;
- уменьшена нагрузка на первую плюсневую головку;
- уменьшена нагрузка на вторую плюсневую головку за счет образования продольной арки и уменьшения площади контакта;
- увеличена нагрузка на четвертую и пятую плюсневые головки;
- увеличена нагрузка на все пальцы за счет увеличения площади контакта под большим пальцем и времени контакта под остальными пальцами.

Значимой разницы в нагрузке третьей плюсневой головки не выявлено. Загрузка пальцев и четвертой-пятой плюсневых головок объясняется перераспределением нагрузки с целью сохранения равновесия во время ходьбы.

В табл. 2 приведены значимо отличные геометрические параметры для КГ, гр. 1 и гр. 2.

Значимые отличия в параметрах КГ и гр. 1 обнаружены для коэффициента распластанности, который в КГ значимо меньше, чем в гр. 1, и меньше ( $p < 0,05$ ), чем в гр. 2. При ходьбе «динамическая» ширина стопы у пациентов из гр. 2 значимо меньше как в подъеме, так и в среднем отделе стопы и в самом узком месте, что приводит к уменьшению площади контакта.

В табл. 3 приведены значения арочного индекса для КГ, гр. 1 и гр. 2 и распределение значений арочного индекса по трем подгруппам. Для определения типа стопы использовался критерий, основанный на значении арочного индекса [17].

Таблица 2

## Геометрические параметры (значимые отличия)

| Параметры                                                    | Контрольная группа | Группа 1     | Группа 2     |
|--------------------------------------------------------------|--------------------|--------------|--------------|
| Ширина стопы (в подъеме)                                     | 3,8 (0,7)          | 3,1* (1,8)   | 2,6 (1,8)    |
| Ширина стопы (в самом узком месте)                           | 2,8 (0,5)          | 2,4* (1,4)   | 2,0 (1,4)    |
| Ширина стопы в среднем отделе                                | 3,2 (0,6)          | 2,8* (1,6)   | 2,4 (1,6)    |
| Коэффициент отношения ширины переднего отдела к ширине пятки | 0,59 (0,04)        | 0,60 (0,07)  | 0,61* (0,06) |
| Коэффициент распластанности (отношение ширины к длине стопы) | 0,36 (0,02)        | 0,38* (0,03) | 0,37 (0,03)  |

Примечание: здесь и далее указано среднее значение, в скобках указано среднеквадратическое отклонение (СКО); \* — отмечено статистически значимое большее значение.

Table 2

## Geometric parameters (significant differences)

| Parameters                                                   | Control group | Group 1      | Group 2      |
|--------------------------------------------------------------|---------------|--------------|--------------|
| Foot width (in ascent)                                       | 3.8 (0.7)     | 3.1* (1.8)   | 2.6 (1.8)    |
| Foot width (at the narrowest point)                          | 2.8 (0.5)     | 2.4* (1.4)   | 2.0 (1.4)    |
| The width of the foot in the middle section                  | 3.2 (0.6)     | 2.8* (1.6)   | 2.4 (1.6)    |
| The ratio of the width of the front to the width of the heel | 0.59 (0.04)   | 0.60 (0.07)  | 0.61* (0.06) |
| Spread ratio (ratio of width to foot length)                 | 0.36 (0.02)   | 0.38* (0.03) | 0.37 (0.03)  |

Note: the average value is indicated here and below, and the standard deviation (SD) is indicated in parentheses; (\*) a statistically significant higher value is indicated.

Таблица 3

## Арочный индекс

| Параметры                             | Диапазон     | Контрольная группа | Группа 1     | Группа 2    |
|---------------------------------------|--------------|--------------------|--------------|-------------|
| Арочный индекс                        |              | 0,24 (0,02)        | 0,22* (0,07) | 0,20 (0,08) |
| «Полая» стопа ( <i>pes cavus</i> )    | ≤ 0,21       | 0                  | 11 (33,3%)   | 29 (64,4%)  |
| Нормальная                            | (0,21; 0,26) | 31 (91,2%)         | 12 (36,4%)   | 8 (17,8%)   |
| «Плоская» стопа ( <i>pes planus</i> ) | ≥ 0,26       | 3 (8,8%)           | 10 (30,3%)   | 8 (17,8%)   |

Примечание: учитывались данные больных РС, у которых арочный индекс находился в заданном диапазоне у обеих стоп.

Table 3

## Arch index

| Parameters                         | Range        | Control group | Group 1      | Group 2     |
|------------------------------------|--------------|---------------|--------------|-------------|
| Arch index                         |              | 0.24 (0.02)   | 0.22* (0.07) | 0.20 (0.08) |
| “Hollow” foot ( <i>pes cavus</i> ) | ≤ 0.21       | 0             | 11 (33.3%)   | 29 (64.4%)  |
| Normal foot                        | (0.21; 0.26) | 31 (91.2%)    | 12 (36.4%)   | 8 (17.8%)   |
| “Flat” foot ( <i>pes planus</i> )  | ≥ 0.26       | 3 (8.8%)      | 10 (30.3%)   | 8 (17.8%)   |

Note: the data of MS patients whose arch index was in a given range at both feet were taken into account.

Таблица 4

## Индекс центра давления

| Индекс центра давления с осями  | Контрольная группа | Группа 1    | Группа 2    |
|---------------------------------|--------------------|-------------|-------------|
| центр пятки — центр 2-го пальца | 1,39 (0,20)*       | 1,25 (0,28) | 1,24 (0,31) |
| биссектриса плантарного угла    | 1,27 (0,11)*       | 1,15 (0,14) | 1,14 (0,16) |
| линия ходьбы                    | 1,53 (0,67)        | 1,51 (0,64) | 1,47 (1,23) |

Table 4

## Pressure center index

| Index of the center of pressure with axes              | Control group | Group 1     | Group 2     |
|--------------------------------------------------------|---------------|-------------|-------------|
| The center of the heel is the center of the 2nd finger | 1.39 (0.20)*  | 1.25 (0.28) | 1.24 (0.31) |
| Bisector of the plantar angle                          | 1.27 (0.11)*  | 1.15 (0.14) | 1.14 (0.16) |
| walking line                                           | 1.53 (0.67)   | 1.51 (0.64) | 1.47 (1.23) |

В гр. 2 арочный индекс значимо меньше, что свидетельствует о наличии арочного свода в среднем отделе. Если в гр. 1 имеет место практически одинаковое число пациентов с нормальной, полной или плоской стопой, то в гр. 2 существенно преобладает число пациентов с «полой» стопой.

Центр давления (или линия ходьбы) представляет собой пространственное распределение давления во времени [22]. По мнению L. Wong и соавт. [23], центр давления дает более глубокую информацию о динамической функции стопы, чем такие параметры, как пиковое давление, максимальная сила и др.

Таблица 5

**Корональный и модифицированный корональный индексы для группы 1 и группы 2**

| Индекс                              | Контрольная группа | Группа 1     | Группа 2   | <i>p</i> |
|-------------------------------------|--------------------|--------------|------------|----------|
| Корональный индекс                  | -7,0 (35,6)        | 14,8* (47,3) | 6,7 (46,7) | < 0,005  |
| Модифицированный корональный индекс | -14,2 (56,0)       | 17,3* (73,2) | 7,9 (73,5) | < 0,05   |

Table 5

**Coronal and modified coronal indices for group 1 and group 2**

| Index                  | Control group | Group 1      | Group 2    | <i>p</i> |
|------------------------|---------------|--------------|------------|----------|
| Coronal index          | -7.0 (35.6)   | 14.8* (47.3) | 6.7 (46.7) | < 0.005  |
| Modified coronal index | -14.2 (56.0)  | 17.3* (73.2) | 7.9 (73.5) | < 0.05   |

Таблица 6

**Индекс пронации-супинации, %**

| Параметры                | Контрольная группа | Группа 1   | Группа 2     |
|--------------------------|--------------------|------------|--------------|
| ИПС (контакт стопы)      | 54,1 (5,5)*        | 52,5 (5,5) | 52,2 (6,7)   |
| ИПС (ранняя фаза опоры)  | 52,6 (4,7)*        | 50,5 (6,9) | 50,2 (6,4)   |
| ИПС (середина опоры)     | 52,3 (6,8)*        | 48,7 (9,6) | 49,0 (9,0)   |
| ИПС (поздняя фаза опоры) | 49,4 (6,1)*        | 45,9 (8,5) | 46,6 (8,4)   |
| ИПС (отрыв пальцев)      | 29,2 (7,7)         | 28,1 (9,3) | 32,7 (10,2)* |

Table 6

**Pronation-supination index, %**

| Parameters                      | Control group | Group 1    | Group 2      |
|---------------------------------|---------------|------------|--------------|
| PSI (foot contact)              | 54.1 (5.5)*   | 52.5 (5.5) | 52.2 (6.7)   |
| PSI (early support phase)       | 52.6 (4.7)*   | 50.5 (6.9) | 50.2 (6.4)   |
| PSI (the middle of the support) | 52.3 (6.8)*   | 48.7 (9.6) | 49.0 (9.0)   |
| PSI (late phase of support)     | 49.4 (6.1)*   | 45.9 (8.5) | 46.6 (8.4)   |
| PSI (finger separation)         | 29.2 (7.7)    | 28.1 (9.3) | 32.7 (10.2)* |

В табл. 4 приведены значения индекса центра давления для трех разделений стопы на латеральную и медиальную части: осью, проходящей через центр пятки и центр второго пальца, биссектрисой продольного плантарного угла, образованного касательными, проведенными к латеральной и медиальной сторонам стопы и линией ходьбы.

Индекс центра давления не отличается у пациентов в гр. 1 и гр. 2. Индекс центра давления равен или меньше 1 для 18% и больше 1 для 82% обследованных. Индекс центра давления в КГ значительно больше, чем в гр. 1 и гр. 2, при использовании в качестве осей линии, соединяющей центры пятки и центр второго пальца и биссектрисы продольного плантарного угла и не отличается, если в качестве линии разделения выбрана линия ходьбы. В целом данный параметр свидетельствует о том, что чем больше площадь контакта латеральной части стопы по сравнению с медиальной, тем обеспечивается большая устойчивость.

В табл. 5 приведены значения коронального и модифицированного коронального индекса для КГ, гр. 1 и гр. 2.

Корональный и модифицированный корональный индексы имеют отрицательные значения для КГ за счет того, что нагрузка медиальной части стопы меньше загрузки латеральной части. Корональный и модифицированный корональный индексы значительно меньше в гр. 2 по сравнению с гр. 1. Большинство обследованных имели более загруженную медиальную часть стопы по сравнению с латеральной, что

свидетельствует о преобладании вальгусного типа стопы. Однако, большой разброс не позволяет сделать вывод о степени деформации. Кроме того, модифицированный корональный индекс, учитывающий нагрузку на пятку, не вносит дополнительной информации и может быть исключен из дальнейшего анализа.

Для анализа вклада супинации стопы или избыточной пронации используется индекс пронации-супинации.

В табл. 6 приведены значения ИПС для КГ, гр. 1 и гр. 2.

ИПС практически одинаков для гр. 1 и гр. 2. Исключение составляет ИПС в момент отрыва пальцев, который значительно меньше в гр. 1. Однако в КГ во все моменты времени за исключением отрыва пальцев ИПС значительно больше, чем в гр. 1 и гр. 2.

Для анализа функции стопы использован индекс отклонения центра давления (ИОЦД).

В табл. 7 приведены значения ИОЦД для КГ, гр. 1, гр. 2 для трех типов стопы: «полой», нормальной и «плоской».

Для нормального типа стопы значения ИОЦД по сравнению с «полой» и «плоской» стопами меньше ( $p < 0,05$ ) для гр. 1 и больше ( $p < 0,05$ ) для гр. 2. Значимых отличий в значениях ИОЦД для «полой» и «плоской» стоп нет. Для нормального типа стопы ИОЦД значительно меньше в гр. 1 по сравнению с КГ и меньше ( $p < 0,05$ ) в гр. 2, т.е. менее вогнутая траектория (указывающая на более медиальное отклонение)

Таблица 7

Индекс отклонения центра давления, %

| ИОЦД            | Контрольная группа | Группа 1      | Группа 2     |
|-----------------|--------------------|---------------|--------------|
| «Полая» стопа   | 0                  | 13,33 (12,17) | 8,2 (9,9)    |
| Нормальная      | 15,81 (8,99)*      | 9,15 (10,18)  | 12,21 (9,02) |
| «Плоская» стопа | 13,02 (9,35)       | 12,45 (10,10) | 8,68 (8,65)  |

Table 7

Pressure center deviation index, %

| PCDI          | Control group | Group 1       | Group 2      |
|---------------|---------------|---------------|--------------|
| “Hollow” foot | 0             | 13.33 (12.17) | 8.2 (9.9)    |
| Normal foot   | 15.81 (8.99)* | 9.15 (10.18)  | 12.21 (9.02) |
| “Flat” foot   | 13.02 (9.35)  | 12.45 (10.10) | 8.68 (8.65)  |

линии ходьбы найдена в гр. 1 для нормального типа стопы. Обращает внимание, что в гр. 1 и гр. 2 для всех значений ИОЦД среднее и стандартное отклонение одного порядка, что говорит о большом разбросе значений.

**Обсуждение.** Больные с РС с умеренными нарушениями, полностью мобильные или передвигающиеся без посторонней помощи (64,4%), чаще имеют «полую» стопу по сравнению с больными РС с минимальными или незначительными нарушениями (33,3%), что связано с уменьшением нагрузки на средний отдел стопы с прогрессированием заболевания. Для большинства включенных в данное исследование пациентов нагрузка медиальной части стопы была больше, чем латеральной, что свидетельствует о преобладании вальгусной стопы (62,3% стоп) [19]. Как следствие, это усугубляет нарушение равновесия. Значения индекса отклонения центра давления типичны для пронации стоп [20]. Пронация также подтверждена уменьшенными значениями индекса пронации-супинации при контакте опоры, ранней, средней и поздней фаз опоры [24] в обеих группах. Однако индекс пронации-супинации значительно больше у больных с умеренными нарушениями в заключительной фазе отрыва пальцев от опоры.

**Заключение.** Оценка деформации стоп на основе измерения биомеханических параметров распределения плантарного давления дает практическую возможность планировать медикаментозное лечение для уменьшения спастичности, подбора ортопедических стелек, обуви, приспособлений для улучшения ходьбы больных РС.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Финансирование.** Исследование не имело спонсорской поддержки.

**Conflict of interest.** The authors declare no conflict of interest.

**Acknowledgements.** The study had no sponsorship.

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Шмидт Т.Е., Яхно Н.Н. Рассеянный склероз: руководство для врачей. 7-е изд. Москва: МЕДпресс-информ, 2021:280 с. [Schmidt T.E., Yakhno N.N. Multiple sclerosis: a guide for doctors. 7 issue. Moscow. Medpress-inform, 2021:280 p. (In Russ.)]. ISBN 978-5-00030-831-8 [https://static-sl.insales.ru/files/1/4220/15167612/original/rass\\_skleroz\\_.pdf](https://static-sl.insales.ru/files/1/4220/15167612/original/rass_skleroz_.pdf)

2. Hobart J.C., Riazi A., Lamping D.L., Fitzpatrick R., Thompson A.J. Measuring the impact of MS on walking ability: the 12-item MS walking scale (MSWS-12). *Neurology*. 2003;60:31–6. <https://doi.org/10.1212/wnl.60.1.31>
3. Comber L., Sosnoff J.J., Galvin R., Coote S. Postural control deficits in people with multiple sclerosis: a systemic review and meta-analysis. *Gait Posture*. 2018;61:445–52. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2018.02.018>
4. Pita-Fernandez S., Gonzalez-Martin C., Alonso-Tajes F., Seoane-Pillado T., Pertega-Diaz S., Perez-Garcia S. et al. Flat foot in a random population and its impact on quality of life and functionality. *J Clin Diagn Res*. 2017;11:LC22–7. <https://doi.org/10.7860/jcdr/2017/24362.9697>
5. Larocca N.G. Impact of walking impairment in multiple sclerosis: perspectives of patients and care partners. *Patient*. 2011;4:189–201. <https://doi.org/10.2165/11591150-000000000-00000>
6. Gonzalez-Martin C., Alonso-Tajes F., Perez-Garcia S., Seoane-Pillado M.T., Pertega-Diaz S., Couceiro-Sanchez E. et al. Hallux valgus in a random population in Spain and its impact on quality of life and functionality. *Rheumatol Int*. 2017;37:1899–907. <https://doi.org/10.1007/s00296-017-3817-z>
7. Menz H.B., Auhl M., Spink M.J. Foot problems as a risk factor for falls in community-dwelling older people: a systematic review and meta-analysis. *Maturitas*. 2018;118:7–14. <https://doi.org/10.1016/j.maturitas.2018.10.001>
8. Mickle K.J., Munro B.J., Lord S.R., Menz H.B., Steele J.R. Gait, balance and plantar pressures in older people with toe deformities. *Gait Posture*. 2011;34:347–351. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2011.05.023>
9. Chopra S., Moerenhout K., Crevoisier X. Characterization of gait in female patients with moderate to severe hallux valgus deformity. *Clin Biomech*. 2015;30:629–635. <https://doi.org/10.1016/j.clinbiomech.2015.03.021>
10. Lee C.R., Kim M.K. The effects on muscle activation of flat-foot during gait according to the velocity on an ascending slope. *J Phys Ther Sci*. 2014;26:675–677. <https://doi.org/10.1589/jpts.26.675>
11. Kim M.K. Foot pressure analysis of adults with flat and normal feet at different gait speeds on an ascending slope. *J Phys Ther Sci*. 2015;27:3767–3769. <https://doi.org/10.1589/jpts.27.3767>
12. Foot Health Toe Deformities Should Be Treated Early: Experts By Mary Elizabeth Dallas, Health Day News.
13. Stolt M., Laitinen A.M., Ruutiainen J., Leino-Kilpi H. Research on lower extremity health in patients with multiple sclerosis: a systematic scoping review. *J Foot Ankle Res*. 2020;13(1):54. <https://doi.org/10.1186/s13047-020-00423-x>
14. Rusu L., Neamtu M.C., Rosulescu E., Cosma G., Dragomir M., Marin M.I. Analysis of foot and ankle disorders and prediction of gait in multiple sclerosis rehabilitation. *Eur J Med Res*. 2014;19(1):73. <https://doi.org/10.1186/s40001-014-0073-5>
15. Thompson A.J., Banwell B.L., Barkhof F., Carroll W.M., Coetzee T., Comi G. et al. Diagnosis of multiple sclerosis: 2017 re-

- visions of the McDonald criteria. *Lancet Neurol.* 2018;17(2):162–173. [https://doi.org/10.1016/s1474-4422\(17\)30470-2](https://doi.org/10.1016/s1474-4422(17)30470-2)
16. Петров А.М., Столяров И.Д., Шкильнюк Г.Г., Ильвес А.Г., Минеев К.К., Лебедев В.В., Цветкова Т.Л. Динамика нарушений ходьбы при рассеянном склерозе. *Неврология, нейропсихиатрия, психосоматика.* 2015;7(1):27–32. [Petrov A.M., Stolyarov I.D., Shkilnyuk G.G., Ilves A.G., Mineev K.K., Lebedev V.V., Tsvetkova T.L. Time course of changes in the development of gait disorders in multiple sclerosis. *Neurology, Neuropsychiatry, Psychosomatics.* 2015;7(1):27–32. (In Russ.)]. <https://doi.org/10.14412/2074-2711-2015-1-27-32>
17. Cavanagh P.R., Rodgers M.M. The Arch Index: A Useful Measure from Footprints. *J Biomech.* 1987;20:547–551. [https://dx.doi.org/10.1016/0021-9290\(87\)90255-7](https://dx.doi.org/10.1016/0021-9290(87)90255-7)
18. Scherer P. Step on the GAS. *J Biomech.* 1994;3(33):61–66.
19. Chang C.H., Miller F., Schuyler J. Dynamic Pedobarograph in Evaluation of Varus and Valgus Foot Deformities. *J Pediatric Orthop.* 2002;22:813–818. <https://journals.lww.com/pedorthopaedics/toc/2002/11000>
20. Hillstrom H.J., Song J., Kraszewski A.P., Hafer J.F., Mootanah R., Dufour A.B. et al. Foot type biomechanics part 1: Structure and function of the asymptomatic foot. *Gait Posture.* 2013;37(3):445–451. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2012.09.007>
21. Song J., Hillstrom H.J., Secord D., Levitt J. Foot type biomechanics. comparison of planus and rectus foot types. *J Am Podiatr Med Assoc.* 1996;86(1):16–23. <https://doi.org/10.7547/87507315-86-1-16>
22. Cornwall M.W., McPoil T.G. Velocity of the center of pressure during walking. *J Am Podiatr Med Assoc.* 2000;90(7):334–338. <https://doi.org/10.7547/87507315-90-7-334>
23. Wong L., Hunt A., Burns J., Crosbie J. Effect of foot morphology on center-of-pressure excursion during barefoot walking. *J Am Podiatr Med Assoc.* 2008;98(2):112–117. <https://doi.org/10.7547/0980112>
24. Nawata K., Nishihara S., Hayashi I., Teshima R. Plantar pressure distribution during gait in athletes with functional instability of the ankle joint: preliminary report. *J Orthop Sci.* 2005;10:298–301. <https://doi.org/10.1007/s00776-005-0898-4>

Поступила 20.10.2022  
Принята к печати 06.06.2023