



УДК 612.766; 616.831-009.11; 616.74-071.5

EDN [DVIYSO](https://doi.org/10.33910/2687-1270-2023-4-3-356-366)

<https://doi.org/10.33910/2687-1270-2023-4-3-356-366>

Локомоторный профиль сократительного ресурса мышц у больных ДЦП и здоровых сверстников

Д. В. Долганов¹, А. О. Трофимов¹, Т. И. Долганова^{✉1}

¹Национальный медицинский исследовательский центр травматологии и ортопедии имени академика Г. А. Илизарова, 640014, Россия, г. Курган, ул. М. Ульяновой, д. 6

Сведения об авторах

Дмитрий Владимирович Долганов, SPIN-код: 6714-6049, Scopus AuthorID: 6504378027, ResearcherID: B-9578-2018, ORCID: 0000-0002-8708-1303, e-mail: paradigma-dv@rambler.ru

Анатолий Олегович Трофимов, SPIN-код: 1386-6678, ResearcherID: IYT-4172-2023, ORCID: 0000-0003-3455-4530, e-mail: a4texa@yandex.ru

Тамара Игоревна Долганова, SPIN-код: 9221-3900, Scopus AuthorID: 7801649495, ResearcherID: B-8897-2018, ORCID: 0000-0002-0117-3451, e-mail: rjik532007@rambler.ru

Для цитирования: Долганов, Д. В., Трофимов, А. О., Долганова, Т. И. (2023) Локомоторный профиль сократительного ресурса мышц у больных ДЦП и здоровых сверстников. *Интегративная физиология*, т. 4, № 3, с. 356–366. <https://doi.org/10.33910/2687-1270-2023-4-3-356-366> EDN [DVIYSO](https://doi.org/10.33910/2687-1270-2023-4-3-356-366)

Получена 20 августа 2023; прошла рецензирование 8 октября 2023; принята 10 октября 2023.

Финансирование: Исследование выполнено в рамках государственного задания на осуществление научных исследований и разработок ФГБУ «НМИЦ ТО имени академика Г. А. Илизарова «Использование компьютерного анализа движений в обосновании алгоритма ортопедического хирургического лечения пациентов с ДЦП».

Права: © Д. В. Долганов, А. О. Трофимов, Т. И. Долганова (2023). Опубликовано Российским государственным педагогическим университетом им. А. И. Герцена. Открытый доступ на условиях лицензии [CC BY-NC 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/).

Аннотация. Актуальность исследования обусловлена разработкой оценочных критериев локомоторного профиля сократительного ресурса мышц у больных с ДЦП, касающихся перспектив последующей функциональной реабилитации. Обследованы здоровые подростки (12 человек) и пациенты с ДЦП (14 человек). Методики исследования: динамометрия мышц бедра и голени, 3D-видеоанализ походки. Анализ материала показал, что в синергетических системах функциональную мышечную активность в двигательных стереотипах правомерно оценивать не по отдельным группам или профилям групп, а по их обобщенной активности — локомоторному сократительному ресурсу (ЛСР). Количественный показатель ЛСР для оценки конечного приспособительного результата в виде локомоции адекватно отслеживает степень компенсаторного привлечения функциональных ресурсов мышечной активности. Его величина в выборочных совокупностях компенсаторно возрастает с увеличением степени нарушений локомоторной функции пациентов (паттерна походки). У здоровых и у больных с легкой степенью нарушения локомоторной функции гипотеза нормальности распределения показателя ЛСР не отклонялась по 13 одномерным критериям. У пациентов с более тяжелыми нарушениями локомоторной функции и при более высоких значениях показателя ЛСР гипотеза нормальности распределения отклонялась по девяти критериям. Изменение функции распределения показателя ЛСР с его ростом в выборочных совокупностях свидетельствует о том, что его прирост осуществляется не только за счет перераспределения активности тестируемых групп мышц, но и за счет дополнительного включения активности неочевидных мышечных комплексов. Как по выборочным совокупностям, так и персональным данным обобщенный по восьми группам мышц нижних конечностей количественный показатель ЛСР имеет высокий статус информативности и достаточно полно характеризует объем сократительного ресурса, необходимого для функционального обеспечения конечного приспособительного результата в виде локомоции.

Ключевые слова: здоровые дети, детский церебральный паралич (ДЦП), локомоция, сократительный ресурс мышц, видеоанализ походки, динамометрия

Locomotor profile of muscle contractile potential in patients with cerebral palsy and healthy peers

D. V. Dolganov¹, A. O. Trofimov¹, T. I. Dolganova^{✉1}

¹ National Medical Research Center for Traumatology and Orthopedics Named After Academician G. A. Ilizarov of Russian Ministry of Health, 6 M. Ulianovoy Str., Kurgan 640014, Russia

Authors

Dmitry V. Dolganov, SPIN: 6714-6049, Scopus AuthorID: 6504378027, ResearcherID: B-9578-2018, ORCID: 0000-0002-8708-1303, e-mail: paradigma-dv@rambler.ru

Anatoly O. Trofimov, SPIN: 1386-6678, ResearcherID: IYT-4172-2023, ORCID: 0000-0003-3455-4530, e-mail: a4texa@yandex.ru

Tamara I. Dolganova, SPIN: 9221-3900, Scopus AuthorID: 7801649495, ResearcherID: B-8897-2018, ORCID: 0000-0002-0117-3451, e-mail: rjik532007@rambler.ru

For citation: Dolganov, D. V., Trofimov, A. O., Dolganova, T. I. (2023) Locomotor profile of muscle contractile potential in patients with cerebral palsy and healthy peers. *Integrative Physiology*, vol. 4, no.3, pp. 356–366. <https://doi.org/10.33910/2687-1270-2023-4-3-356-366> EDN DVIYSO

Received 20 August 2023; reviewed 8 October 2023; accepted 10 October 2023.

Funding: The study was carried out as part of the state-commissioned assignment for research and development — Computer Analysis of Movement to Support the Algorithm of Orthopedic Surgical Treatment of Patients with Cerebral Palsy — to the National Ilizarov Medical Research Centre for Traumatology and Orthopaedics of the Russian Ministry of Health.

Copyright: © D. V. Dolganov, A. O. Trofimov, T. I. Dolganova (2023). Published by Herzen State Pedagogical University of Russia. Open access under [CC BY-NC License 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/).

Abstract. The study aimed to develop evaluation criteria for the locomotor profile of muscle contractile potential in patients with cerebral palsy. It involved healthy adolescents (12 people) and patients with cerebral palsy (14 people). The research methods included dynamometry and 3D video analysis of gait. In synergistic systems, it is more reasonable to evaluate functional muscle activity in motor stereotypes through their generalized activity — locomotor contractile potential (LCP). LCP adequately monitors the compensatory use of functional muscle potential. The more serious the violations of the locomotor function are, the higher the compensatory value is. Healthy subjects and patients with mild locomotor disorders showed a normal LCP distribution and the hypothesis was not rejected on any of the 13 one-dimensional criteria. In patients with more severe disorders, the hypothesis of normal distribution was rejected on 9 criteria. The change in the LCP distribution function and its growth is due to the redistribution of activity of the tested muscle groups and the inclusion of additional muscle complexes whose activity was not evaluated. According to the sample sets and personal data, the LCP quantitative indicator generalized for eight groups of muscles of the lower extremities is highly informative and quite effectively describes the amount of contractile potential necessary for the functional implementation of adaptation in the form of locomotion.

Keywords: healthy children, cerebral palsy, locomotion, muscle contraction resource, video analysis of gait, dynamometry

Введение

Наличие мышечной слабости и важность поддержания мышечной силы у детей с детским церебральным параличом (ДЦП) хорошо известны, при этом для измерения изометрической силы тестируемых групп мышц использовали, как правило, ручную динамометрию в изометрическом режиме. Результаты обследований с применением динамометрии показали, что силовые характеристики тестируемых мышечных групп во всех возрастных категориях у здоровых детей 7–16 лет по сравнению со сверстниками с ДЦП значительно выше ($p < 0,001$). (Darras et al. 2021; Moll et al. 2022). Однако кон-

центрические двигательные стереотипы (Самсонова 2007), использующиеся для оценки изометрической силы, существенно отличаются от эксцентрических стереотипов при ходьбе и не содержат информации о максимальных моментах силы, индуцируемых в мышцах при различных темпах походки и угловых положениях в суставах, наблюдаемых во время локомоторной активности. Фосанг и Бейкер для определения «мышечного (сократительного) резерва» отдельных групп мышц предложили метод сопоставления результатов изометрического измерения максимальной мышечной силы с моментами силы, регистрируемыми в суставах при ходьбе (Fosang, Baker 2006). Для правомерного

сопоставления величин значения изометрической силы выражали в тех же единицах, что и суставные моменты силы из анализа 3D-походки ($N \cdot m/kg$) с учетом длины рычага. Клиническая актуальность в использовании оценок «сократительного резерва» обусловлена приближенным установлением «функционального порога», за пределами которого последующий реабилитационный прогресс не выражен или не возможен (Valadão et al. 2021).

Результаты сопоставительных оценок у здоровых детей показали, что изометрическая мышечная сила в уступательном режиме большинства групп мышц в два-пять раз превышала прилагаемый момент силы при ходьбе. Исключение составляла сила мышц подошвенных сгибателей стопы, которая в отличие от остальных мышечных групп более чем на 14% превышала изометрический максимум (Dallmeijer et al. 2011).

Упомянутым методом подобные тенденции в результатах исследования мышечной силы получены и при обследовании подростков с идиопатическим сколиозом. Так, если снижение локомоторного «мышечного резерва» при скорости ходьбы $3,7 \div 4,3$ км/ч составило для разгибателей мышц бедра 40% и для разгибателей мышц голени 70%, то в отношении мышц подошвенных сгибателей стопы кинетические величины моментов силы также превышали изометрические максимумы, но уже на 30–40% и статистически значимо (Долганова и др. 2023). Поскольку для подошвенных сгибателей стопы кинетические величины моментов силы превышают изометрические максимумы, в значительной степени зависят от скорости ходьбы (Долганова и др. 2022) и не отражают предельные силовые величины сократительной функции, то рассматриваемый метод не может однозначно и безоговорочно использоваться не только для расчета «сократительного резерва» этой группы мышц, но и для оценки сократительного резерва всего локомоторного профиля мышц.

Следовательно, для оценки перспектив, касающихся последующей функциональной реабилитации обследуемых пациентов, локомоторный профиль тестируемых групп мышц следует рассматривать не как сократительный резерв или потенциал, а только как наблюдаемый при конкретной скорости ходьбы сократительный мышечный ресурс двигательного стереотипа, зависящий от тяжести двигательной патологии и степени компенсаторной мобилизации участвующих в обеспечении походки мышц.

Цель исследования — определить информативность оценок локомоторного профиля со-

кратительного ресурса мышц у больных с ДЦП при паттернах походки *Equines* и *Jump* в сравнении со здоровыми сверстниками.

Материалы и методы исследования

В исследовании приняли участие 26 подростков.

Критерий включения:

- Здоровые подростки без ортопедической патологии в возрасте 9–15 лет.
- Пациенты в возрасте 9–15 лет с билатеральными спастическими формами церебрального паралича, интеллектуально сохранные, ранее не лечившиеся оперативными методами, при ходьбе не использовали дополнительные средства опоры, двигательные нарушения уровня GMFCS II, симметричный паттерн походки типа *Jump* и истинный *Equines*. Данная выборка была сформирована на протяжении двух лет (2021–2022 гг.).

Критерий исключения:

- другой возрастной диапазон, сниженный интеллектуальный уровень, использование при ходьбе дополнительных средств опоры, ранее оперированные, другой паттерн походки, другие уровни GMFCS.

Обследуемые были разделены на три группы, статистически близкие по возрастным и скоростным характеристикам:

I группа — 12 человек (24 конечности), здоровые подростки (4 мальчика, 8 девочек) в возрасте от 9,5 до 13,5 лет — 11,5 ($9,7 \div 13,5$). Медианные значения скорости ходьбы — 1,01 ($0,95 \div 1,11$) м/с.

II группа — 6 человек (12 конечностей), подростки с ДЦП, паттерн походки истинный *Equines* (2 мальчика, 4 девочки) в возрасте от 9 до 15 лет — 11 ($9 \div 15$). Медианные значения скорости ходьбы — 0,97 ($0,94 \div 1,06$) м/с.

III группа — 8 человек (16 конечностей), подростки с ДЦП, паттерн походки *Jump* (3 мальчика, 5 девочек) в возрасте от 9,5 до 13,5 лет — 11 ($9,5 \div 13,5$). Медианные значения скорости ходьбы — 1,0 ($0,87 \div 1,11$) м/с.

Методики исследования: динамометрия — специализированные динамометрические стенды для тестирования мышц бедра и голени, разработанные в Центре Илизарова (Щуров и др. 2014; 2016), 3D-видеоанализ походки.

Объект исследования: мышцы сгибатели / разгибатели бедра, приведение / отведение бедра, сгибатели / разгибатели голени, сгибатели / разгибатели стопы.

Анализ данных

Подобранные для исследования группы были близки по возрастным и ростовым характеристикам, но у пациентов с ДЦП вес тела был существенно (на 25–40%) меньше. Поэтому для более адекватного метрического сопоставления выборочных совокупностей в процессе исследования оценку максимального момента силы тестируемой группы мышц всегда относили к весу тела обследуемого (H^*m/kg). Сократительное тестирование подошвенных и тыльных сгибателей стопы в изометрическом режиме производили в положении сидя при угле в коленном суставе 90° и при угле в голеностопном суставе 90° ; тестирование разгибателей голени — в положении сидя при угле в коленном суставе 90° .

Нормированные относительно веса тела кинетические данные регистрировали на шести динамометрических платформах KISTLER (Швейцария) в процессе видеоанализа походки с технологией видеозахвата пассивных маркеров (восемь оптических камер Qualisys 7+). Анализ кинетики с данных динамометрических платформ проводили в программах QTM (Qualisys) и Visual3D (C-Motion) с автоматизированным расчетом значений (Аксенов, Клишкова 2020). Рассчитывали мощность работы суставов (тазобедренный, коленный, голеностопный), их обобщенную пиковую мощность как сумму абсолютных величин генерации и релаксации всех суставов и эффективность работы суставов как процентную долю генерации в обобщенной пиковой мощности (Долганова и др. 2022).

Реализуемую сократительную функцию тестируемой группы мышц в двигательном стереотипе при ходьбе (сократительный ресурс) оценивали как отношение модуля расчетной кинетической величины суставного момента силы мышц к их изометрическому максимуму при произвольном сокращении, выраженное в процентах, а «сократительный мышечный резерв или потенциал» — как остаточный процент от реально используемой сократительной функции, регистрируемой при ходьбе. Сократительный ресурс локомоторного стереотипа или локомоторный сократительный ресурс (ЛСР) оценивали как среднее значение сократительных ресурсов по всем восьми тестируемым группам мышц.

Статистическую обработку исходных данных производили с помощью пакета анализа данных Microsoft Excel-2016 и AtteStat. Учитывая выборочные совокупности (в группах по 6–12 человек) и число наблюдений, равное числу

конечностей ($n = 12–24$), была использована непараметрическая статистика. Количественные характеристики показателей в выборочных совокупностях представляли в таблицах в виде $Me (25 \div 75\%)$, а статистическую значимость различий определяли с использованием непарного двухвыборочного критерия Вилкоксона для независимых переменных. Уровень статистической значимости указывали по критерию «р» при $p < 0,05$. Статистическая обработка дополнительного обобщающего расчетного показателя (усредненный по восьми группам мышц компенсаторный сократительный ресурс для локомоторных стереотипов) включала проверку на нормальность распределения по 13 одномерным критериям. В перечень списка критериев входили такие, как модифицированный критерий Колмогорова, модифицированный критерий Смирнова, критерии асимметрии и эксцесса, критерий хи-квадрат Фишера, а также критерии Жарка — Бера, Крамера — Мизеса, Шапиро — Уилка, Андерсона — Дарлинга, Д'Агостино, Гири, Эпса — Палли и Шапиро — Франсиса.

Результаты исследований

Анализ результатов исследования показал (табл. 1), что у пациентов с ДЦП при паттерне походки типа *Equines* относительный момент силы при произвольном максимальном усилии в изометрическом режиме для разгибателей / сгибателей бедра, приводящих / отводящих бедро, разгибателей / сгибателей голени был снижен на 7–30%, но его отличие от значений здоровых сверстников было статистически незначимо. Наоборот, дефицит силы в изометрическом режиме от значений здоровых сверстников отличался только в дистальных мышечных группах: для тыльных сгибателей на 55%, для подошвенных сгибателей стопы на 44%.

У пациентов с ДЦП при паттерне походки типа *Imp* относительный момент силы при произвольном максимальном усилии в изометрическом режиме был статистически значимо снижен уже для большинства групп мышц: разгибателей бедра — на 59%; сгибателей бедра на — 51%; приводящих бедро — на 42%; отводящих бедро — на 61%; разгибателей голени — на 29%; сгибателей голени — на 43%; тыльных сгибателей стопы — на 63%; подошвенных сгибателей стопы — на 44%.

По сравнению с контрольной группой (здоровые) силовая кинетика при паттерне походки типа *Equines* статистически значимо снижена только у приводящих мышц бедра на 14% и тыльных сгибателей стопы на 20% (табл. 2).

Табл. 1. Максимальные относительные моменты силы мышц нижних конечностей (Н*м/кг) при произвольном максимальном усилии в изометрическом режиме Ме (25 ÷ 75)

Группы мышц	Группа I (n = 24)	Группа II (n = 12)	Группа III (n = 16)
Рост, м	1,58 (1,41 ÷ 1,65)	1,46 (1,37 ÷ 1,64)	1,40 (1,33 ÷ 1,49)
Вес, кг	52,0 (31,8 ÷ 61,1)	31,6 (30,0 ÷ 41,7)	38,4 (26,0 ÷ 41,2)
Разгибатели бедра	1,72 (1,51 ÷ 2,52)	1,66 (1,26 ÷ 1,95)	0,72 (0,61 ÷ 1,02) p ^w = 2,87E-06
Сгибатели бедра	1,59 (1,2 ÷ 2,14)	1,18 (0,98 ÷ 1,42)	0,78 (0,53 ÷ 0,93) p ^w = 1,76E-05
Приведение бедра	1,18 (0,98 ÷ 1,39)	1,03 (0,55 ÷ 1,10)	0,69 (0,48 ÷ 0,87) p ^w = 5,24E-05
Отведение бедра	1,38 (1,07 ÷ 1,65)	0,99 (0,85 ÷ 1,16)	0,55 (0,47 ÷ 0,72) p ^w = 8,30E-07
Разгибатели голени	1,30 (1,14 ÷ 1,78)	1,26 (1,03 ÷ 1,51)	1,03 (0,89 ÷ 1,13) p ^w = 0,00079
Сгибатели голени	1,01 (0,89 ÷ 1,14)	1,04 (0,88 ÷ 1,29)	0,58 (0,46 ÷ 0,84) p ^w = 0,00012
Тыльные сгибатели стопы	0,59 (0,54 ÷ 0,66)	0,27 (0,17 ÷ 0,39) p ^w = 1,9E-05	0,22 (0,11 ÷ 0,29) p ^w = 1,95E-07
Подшвенные сгибатели стопы	1,25 (0,86 ÷ 1,54)	0,39 (0,27 ÷ 0,66) p ^w = 1,21E-05	0,54 (0,30 ÷ 0,85) p ^w = 0,00051

Примечание: показана статистическая значимость различий относительно группы I (здоровые), p^w — непарный двухвыборочный критерий Вилкоксона.

Table 1. Maximum relative moments of force of the muscles of the lower extremities (N*m/kg) at an arbitrary maximum effort in the isometric mode, Me (25 ÷ 75)

Muscle groups	Group I (n = 24)	Group II (n = 12)	Group III (n = 16)
Height, m	1.58 (1.41 ÷ 1.65)	1.46 (1.37 ÷ 1.64)	1.40 (1.33 ÷ 1.49)
Weight, kg	52.0 (31.8 ÷ 61.1)	31.6 (30.0 ÷ 41.7)	38.4 (26.0 ÷ 41.2)
Hip extensors	1.72 (1.51 ÷ 2.52)	1.66 (1.26 ÷ 1.95)	0.72 (0.61 ÷ 1.02) p ^w = 2.87E-06
Hip flexors	1.59 (1.2 ÷ 2.14)	1.18 (0.98 ÷ 1.42)	0.78 (0.53 ÷ 0.93) p ^w = 1.76E-05
Hip adduction	1.18 (0.98 ÷ 1.39)	1.03 (0.55 ÷ 1.10)	0.69 (0.48 ÷ 0.87) p ^w = 5.24E-05
Hip abduction	1.38 (1.07 ÷ 1.65)	0.99 (0.85 ÷ 1.16)	0.55 (0.47 ÷ 0.72) p ^w = 8.30E-07
Extensors of the lower leg	1.30 (1.14 ÷ 1.78)	1.26 (1.03 ÷ 1.51)	1.03 (0.89 ÷ 1.13) p ^w = 0.00079
Flexors of the lower leg	1.01 (0.89 ÷ 1.14)	1.04 (0.88 ÷ 1.29)	0.58 (0.46 ÷ 0.84) p ^w = 0.00012
Dorsal flexors	0.59 (0.54 ÷ 0.66)	0.27 (0.17 ÷ 0.39) p ^w = 1.9E-05	0.22 (0.11 ÷ 0.29) p ^w = 1.95E-07
Plantar flexors	1.25 (0.86 ÷ 1.54)	0.39 (0.27 ÷ 0.66) p ^w = 1.21E-05	0.54 (0.30 ÷ 0.85) p ^w = 0.00051

Note: shows the statistical significance of differences relative to group I (healthy), p^w — unpaired two-samples Wilcoxon test.

Табл. 2. Кинетика моментов силы мышц (Н*м/кг) при ходьбе в привычном темпе, Ме (25 ÷ 75)

Группы мышц	Группа I (n = 24)	Группа II (n = 12)	Группа III (n = 16)
Скорость ходьбы, м/с	1,01 (0,95 ÷ 1,11)	0,97 (0,94 ÷ 1,06)	1,00 (0,87 ÷ 1,11)
Разгибатели бедра	0,73 (0,64 ÷ 0,86)	0,59 (0,54 ÷ 0,81)	0,80 (0,66 ÷ 1,00)
Сгибатели бедра	-0,55 (-0,70 ÷ -0,41)	-0,62(-0,73 ÷ -0,41)	0,58(-0,85 ÷ -0,54)
Приведение бедра	0,86 (0,79 ÷ 0,96)	0,74 (0,61 ÷ 0,82) p ^w = 0,00802	0,77 (0,67 ÷ 0,85) p ^w = 0,028
Отведение бедра	-0,06(-0,13 ÷ -0,04)	-0,06(-0,13 ÷ -0,02)	-0,17(-0,18 ÷ -0,09) p ^w = 0,049
Разгибатели голени	0,49 (0,29 ÷ 0,61)	0,52 (0,11 ÷ 0,63)	0,64 (0,54 ÷ 0,74) p ^w = 0,011
Сгибатели голени	-0,28 (-0,39 ÷ -0,08)	-0,05(-0,27 ÷ -0,01)	-0,16(-0,42 ÷ -0,06)
Тыльные сгибатели стопы	-0,11 (-0,15 ÷ -0,09)	-0,09(-0,10 ÷ -0,009) p ^w = 0,01025	-0,02(-0,09 ÷ -0,004) p ^w = 0,00011
Подошвенные сгибатели стопы	1,23 (1,15 ÷ 1,41)	1,14 (1,07 ÷ 1,31)	1,11 (0,99 ÷ 1,13) p ^w = 0,00037

Примечание: показана статистическая значимость различий относительно группы I (здоровые), p^w — непарный двухвыборочный критерий Вилкоксона.

Table 2 Kinetic moments of muscle strength (N*m/kg) when walking at usual pace, Me (25 ÷ 75)

Muscle groups	Group I (n = 24)	Group II (n = 12)	Group III (n = 16)
Walking speed, m/s	1.01 (0.95 ÷ 1.11)	0.97 (0.94 ÷ 1.06)	1.00 (0.87 ÷ 1.11)
Hip extensors	0.73 (0.64 ÷ 0.86)	0.59 (0.54 ÷ 0.81)	0.80 (0.66 ÷ 1.00)
Hip flexors	-0.55 (-0.70 ÷ -0.41)	-0.62(-0.73 ÷ -0.41)	-0.58(-0.85 ÷ -0.54)
Hip adduction	0.86 (0.79 ÷ 0.96)	0.74 (0.61 ÷ 0.82) p ^w = 0.00802	0.77 (0.67 ÷ 0.85) p ^w = 0.028
Hip abduction	-0.06(-0.13 ÷ -0.04)	-0.06(-0.13 ÷ -0.02)	-0.17(-0.18 ÷ -0.09) p ^w = 0.049
Extensors of the lower leg	0.49 (0.29 ÷ 0.61)	0.52 (0.11 ÷ 0.63)	0.64 (0.54 ÷ 0.74) p ^w = 0.011
Flexors of the lower leg	-0.28 (-0.39 ÷ -0.08)	-0.05 (-0.27 ÷ -0.01)	-0.16 (-0.42 ÷ -0.06)
Dorsal flexors	-0.11 (-0.15 ÷ -0.09)	-0.09 (-0.10 ÷ -0.009) p ^w = 0.01025	-0.02 (-0.09 ÷ -0.004) p ^w = 0.00011
Plantar flexors	1.23 (1.15 ÷ 1.41)	1.14 (1.07 ÷ 1.31)	1.11 (0.99 ÷ 1.13) p ^w = 0.00037

Note: shows the statistical significance of differences relative to group I (healthy), p^w — unpaired two-samples Wilcoxon test.

При этом значимо (P^w = 0,01025) низкая кинетика силы тыльных сгибателей стопы не подтвердила своего статистического влияния в пиковой мощности опорного толчка, но все же проявилась в умеренном снижении центральной тенденции этого показателя (табл. 3).

При более тяжелой степени поражения локомоторной функции (паттерн типа *Jump*) снижение кинетических показателей выявлено уже для целого ряда мышечных групп: мышц, приводящих и отводящих бедро, мышц разгибателей голени, мышц тыльных и подошвенных сгибателей стопы. При этом скоростные

Табл. 3. Пиковая мощность работы суставов (Вт/кг) Me (25 ÷ 75)

Суставы	Группа I (n = 24)	Группа II (n = 12)	Группа III (n = 16)
Тазобедренный сустав	1,23 (0,97 ÷ 1,49)	1,21 (1,00 ÷ 1,48)	1,90 (1,35 ÷ 2,36) p ^w = 0,0033
Коленный сустав	1,65 (1,26 ÷ 2,11)	1,75 (1,41 ÷ 2,02)	2,18 (1,67 ÷ 2,89) p ^w = 0,0227
Голеностопный сустав (опорный толчок)	2,83 (2,54 ÷ 3,28)	2,67 (2,03 ÷ 3,04)	2,52 (2,14 ÷ 3,47)
Суммарная мощность работы суставов	5,81 (4,91 ÷ 6,84)	5,51 (4,39 ÷ 6,58)	6,51 (5,16 ÷ 8,47)

Примечание: показана статистическая значимость различий относительно группы I (здоровые), p^w — непарный двухвыборочный критерий Вилкоксона.

Table 3. Peak power of joints (W/kg), Me (25 ÷ 75)

Joints	Group I (n = 24)	Group II (n = 12)	Group III (n = 16)
Hip sagittal power	1.23 (0.97 ÷ 1.49)	1.21 (1.00 ÷ 1.48)	1.90 (1.35 ÷ 2.36) p ^w = 0.0033
Knee sagittal power	1.65 (1.26 ÷ 2.11)	1.75 (1.41 ÷ 2.02)	2.18 (1.67 ÷ 2.89) p ^w = 0.0227
Ankle sagittal power	2.83 (2.54 ÷ 3.28)	2.67 (2.03 ÷ 3.04)	2.52 (2.14 ÷ 3.47)
The total power of joints	5.81 (4.91 ÷ 6.84)	5.51 (4.39 ÷ 6.58)	6.51 (5.16 ÷ 8.47)

Note: shows the statistical significance of differences relative to group I (healthy), p^w — unpaired two-samples Wilcoxon test.

характеристики самостоятельной ходьбы при низких значениях кинетики компенсировались за счет увеличения мощности работы тазобедренного и коленного суставов ≈ на 50% и 30% соответственно.

Во всяком случае, величины опорного толчка и суммарная мощность работы суставов статистически значимо не отличались от значений нормы (табл. 3), но их эффективность оказалась значимо снижена почти на 11% (P^w = 0,0458) для второй группы и на 12% (P^w = 0,00189) для третьей группы.

У пациентов с ДЦП при паттерне походки типа *Equines* использование силового сократительного ресурса для основных групп мышц при ходьбе увеличивалось, но статистически значимый прирост по сравнению с нормой обнаруживался только для подошвенных сгибателей стопы и в обобщенном ресурсе восьми групп мышц всего стереотипа (табл. 4). У пациентов с ДЦП при паттерне походки типа *Jump* компенсаторное использование мышечного сократительного ресурса оказалось еще более выраженным и статистически значимым, как для большего числа мышц, так и в обобщенном ресурсе всего стереотипа.

Обсуждение результатов

Судя по представленным мышечным группам, обобщенные изометрические максимумы силы в выборочных совокупностях (табл. 1) достаточно адекватно и последовательно отслеживают функциональную тяжесть локомоторных нарушений по характеру двигательного паттерна. Однако в виду того, что в эксцентрических локомоторных стереотипах совсем иная природа организации и другие принципы синергического взаимодействия, такая тенденция полностью нарушается в кинетических показателях силы и мощности (табл. 2–3). Как показали ранее проведенные исследования (Долганова и др. 2022; 2023), в локомоторных стереотипах конечный приспособительный результат успешно достигается функциональным перераспределением активности между различными группами мышц, либо их дополнительной мобилизацией. Поэтому и в представленном исследовании статистически незначимые различия в суммарной мощности локомоций (табл. 2–3) достигаются существенно различающимися профилями силовой и мощностной сократительной активностью тестируемых мышц.

Табл. 4. Показатели использования сократительного ресурса отдельных групп мышц нижней конечности (%)

Группы мышц	Группа I (n = 24)	Группа II (n = 12)	Группа III (n = 16)
Разгибатели бедра	36,6 (26,5 ÷ 43,9)	44,0 (30,9 ÷ 53,3)	97,5 (69,4 ÷ 171,8) $p^w = 3,51E-07$
Сгибатели бедра	37,0 (19,2 ÷ 59,4)	46,3 (34,1 ÷ 66,7)	84,9 (67,6 ÷ 105,9) $p^w = 1,76E-05$
Приведение бедра	83,4 (46,5 ÷ 94,5)	74,3 (58,5 ÷ 110,6)	97,5 (89,3 ÷ 162,7) $p^w = 0,0115$
Отведение бедра	4,58 (2,85 ÷ 9,87)	4,27 (2,42 ÷ 14,0)	23,8 (14,6 ÷ 36,2) $p^w = 0,000879$
Разгибатели голени	32,0 (15,9 ÷ 49,7)	36,0 (11,5 ÷ 51,8)	66,7 (57,0 ÷ 74,4) $p^w = 0,000147$
Сгибатели голени	26,5 (7,87 ÷ 38,9)	4,25 (1,18 ÷ 19,1)	19,3 (8,7 ÷ 69,2)
Тыльные сгибатели стопы	16,9 (14,0 ÷ 27,3)	17,7 (7,05 ÷ 24,8)	9,59 (2,55 ÷ 28,7)
Подшвенные сгибатели стопы	102,2 (83,3 ÷ 149,8)	252,6(128,8 ÷ 420,8) $p^w = 0,00267$	261,9 (163,1 ÷ 394,2) $p^w = 0,00015$
Сократительный ресурс локомоторного стереотипа	46,8 (37,1 ÷ 59,3)	68,2 (56,9 ÷ 87,1) $p^w = 0,007634$	95,1 (86,2 ÷ 110,1) $p^w = 2,26E-07$

Примечание: показана статистическая значимость различий относительно группы I (здоровые), p^w — непарный двухвыборочный критерий Вилкоксона.

Table 4. Indicators of the contractile potential of individual muscle groups of the lower limb (%)

Muscle groups	Group I (n = 24)	Group II (n = 12)	Group III (n = 16)
Hip extensors	36.6 (26.5 ÷ 43.9)	44.0 (30.9 ÷ 53.3)	97.5 (69.4 ÷ 171.8) $p^w = 3.51E-07$
Hip flexors	37.0 (19.2 ÷ 59.4)	46.3 (34.1 ÷ 66.7)	84.9 (67.6 ÷ 105.9) $p^w = 1.76E-05$
Hip adduction	83.4 (46.5 ÷ 94.5)	74.3 (58.5 ÷ 110.6)	97.5 (89.3 ÷ 162.7) $p^w = 0.0115$
Hip abduction	4.58 (2.85 ÷ 9.87)	4.27 (2.42 ÷ 14.0)	23.8 (14.6 ÷ 36.2) $p^w = 0.000879$
Extensors of the lower leg	32.0 (15.9 ÷ 49.7)	36.0 (11.5 ÷ 51.8)	66.7 (57.0 ÷ 74.4) $p^w = 0.000147$
Flexors of the lower leg	26.5 (7.87 ÷ 38.9)	4.25 (1.18 ÷ 19.1)	19.3 (8.7 ÷ 69.2)
Dorsal flexors	16.9 (14.0 ÷ 27.3)	17.7 (7.05 ÷ 24.8)	9.59 (2.55 ÷ 28.7)
Plantar flexors	102.2 (83.3 ÷ 149.8)	252.6 (128.8 ÷ 420.8) $p^w = 0.00267$	261.9 (163.1 ÷ 394.2) $p^w = 0.00015$
Contractile potential of the locomotor stereotype	46.8 (37.1 ÷ 59.3)	68.2 (56.9 ÷ 87.1) $p^w = 0.007634$	95.1 (86.2 ÷ 110.1) $p^w = 2.26E-07$

Note: shows the statistical significance of differences relative to group I (healthy), p^w — unpaired two-samples Wilcoxon test.

По-видимому, в опорно-двигательных системах любые проблемы в локомоторной дееспособности, связанные с двигательной патологией, компенсируются функциональным перераспределением нагрузок или путем привлечения дополнительных мышечных ресурсов. Следуя

телеологической логике природы целевого приспособительного поведения в системах синергетического взаимодействия, функциональную мышечную активность в двигательных стереотипах правомернее оценивать не по отдельным группам, а по их суммарной усредненной

активности в тестируемом двигательном стереотипе (табл. 4 — сократительный ресурс локомоторного стереотипа), как в конечном приспособительном результате. В проведенном нами исследовании как по выборочным, так и персональным характеристикам в локомоторных стереотипах усредненный по восьми группам мышц локомоторный сократительный ресурс (АСР) адекватнее всего характеризует конечный приспособительный результат опорно-двигательной системы обследованного контингента. Поскольку расчетный показатель АСР количественно отслеживает конечный приспособительный результат в виде локомоции, то параметры его распределения, как и постратуральные характеристики в ортостатических стереотипах, являющиеся конечным приспособительным результатом (Долганов и др. 2018), могут соответствовать функции нормального распределения. При дополнительном статистическом анализе сделанное предположение полностью подтвердилось даже на небольших выборочных совокупностях. Так, если в контрольной группе здоровых сверстников ($n = 24$) гипотеза на нормальность с уровнем значимости 0,1 не отклонялась по 12 одномерным критериям, во второй группе ($n = 12$) — по всем 13 и наконец, в третьей с более тяжелыми нарушениями локомоторной функции ($n = 16$) — только по четырем критериям. Это значит, что в норме и при слабых нарушениях локомоторной функции рассчитанный по восьми мышечным группам сократительный локомоторный ресурс полностью количественно отслеживает конечный приспособительный результат, а его варьирование зависит только от влияния случайных факторов (Петри, Сэбин 2021). Изменение же функции распределения показателя у больных третьей группы с большей степенью локомоторных нарушений, видимо, было обусловлено тем, что сократительный ресурс локомоторного стереотипа отслеживал только частичную его компенсацию и не отражал влияния дополнительной приспособительной активности со стороны мышечных групп, регулирующих движения рук, головы, шеи и других частей туловища.

Выводы

Профили силовых сократительных ресурсов для двигательных стереотипов со смешанными мышечными режимами сокращений существенно отличаются. Если по характеру локомоторного паттерна обобщенные в выборочных совокупностях изометрические максимумы

мышечных групп достаточно последовательно и однонаправленно отслеживают функциональную степень двигательных нарушений, то при статистически незначимых различиях в суммарной мощности локомоций конечный приспособительный двигательный результат достигается существенно различающимися кинетическими профилями силовой и мощностной сократительной активности тестируемых мышц. То есть, регистрируемый кинетический сократительный ресурс, обеспечивающий локомоторный стереотип, формируется синергетическим комбинированием и перераспределением сократительной активности как тестируемых мышечных групп, так и, возможно, дополнительной мобилизацией новых.

Как по выборочным совокупностям, так и по персональным данным обобщенный по восьми группам мышц нижних конечностей количественный показатель сократительного ресурса локомоторного стереотипа имеет высокий статус информативности и достаточно полно характеризует объем сократительного ресурса, необходимого для функционального обеспечения конечного приспособительного результата в виде локомоции.

У подростков с ДЦП при паттерне походки типа *Equines* более высокие по сравнению с контролем величины показателя АСР по всем 13 критериям соответствуют функции нормального распределения, а потому количественно оценивают локомоцию как функционально необходимое и достаточное синергетическое мышечное взаимодействие для реализации конечного приспособительного результата.

У подростков с ДЦП при паттерне походки типа *Jump* с еще большим ростом значений локомоторного сократительного ресурса нормальное распределение его величин нарушается. При этом сам факт такого нарушения указывает на то, что прирост величин показателя осуществляется не только за счет перераспределения активности тестируемых групп мышц, но и за счет дополнительного включения усилий со стороны неотслеживаемых в представленном обследовании мышечных групп, движения рук, головы, шеи и других частей туловища, участвующих в регуляции компенсаторно-измененного двигательного стереотипа.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии потенциального или явного конфликта интересов.

Conflict of Interest

The authors declare that there is no conflict of interest, either existing or potential.

Соответствие принципам этики

Исследование проведено в соответствии с положениями Хельсинкской декларации Всемирной медицинской ассоциации «Этические принципы медицинских исследований с участием человека в качестве испытуемого».

Ethics Approval

The study was conducted in accordance with the World Medical Association Declaration of Helsinki: Ethical Principles for Medical Research Involving Human Subjects.

Вклад авторов

- а. Долганов Дмитрий Владимирович — анализ результатов, подготовка публикации;
- б. Трофимов Анатолий Олегович — проведение процесса исследования, сбор данных;
- в. Долганова Тамара Игоревна — постановка целей и задач исследования.

Author Contributions

- a. Dmitry V. Dolganov — analysis of the results, drafting the manuscript;
- b. Anatoly O. Trofimov — conducting the research, collecting data;
- c. Tamara I. Dolganova — setting goals and objectives of the study.

Литература

- Аксенов, А. Ю., Клишковская, Т. А. (2020) *Программа формирования отчета биомеханики ходьбы человека. Патент RU2020665238*. Дата регистрации 24.11.2020.
- Долганов, Д. В., Долганова, Т. И., Самылов, В. В. (2018) Оценка нарушений постуральной функции позвоночника в ортостатических стереотипах. *Гений ортопедии*, т. 24, № 3, с. 357–364. <https://doi.org/10.18019/1028-4427-2018-24-3-357-364>
- Долганова, Т. И., Попков, Д. А., Долганов, Д. В., Чибиров, Г. М. (2022) Показатели кинетики локомоторных стереотипов у здоровых детей в различных скоростных диапазонах передвижения. *Гений ортопедии*, т. 28, № 3, с. 417–424. <https://doi.org/10.18019/1028-4427-2022-28-3-417-424>
- Долганова, Т. И., Щурова, Е. Н., Долганов, Д. В. и др. (2023) Локомоторная кинетика мышц нижних конечностей в норме и при идиопатическом сколиозе. *Вестник уральской медицинской академической науки*, т. 20, № 1-2, с. 5–16. <https://doi.org/10.22138/2500-0918-2023-20-1-5-16>
- Петри, А., Сэбин, К. (2021) *Наглядная медицинская статистика*. 4-е изд. М.: ГЭОТАР-Медиа, 232 с.
- Самсонова, А. В. (2007) *Моторная и сенсорная функция мышц в биомеханике локомоций*. СПб.: НГУ им. П. Ф. Лесгафта, 152 с.
- Щуров, В. А., Долганова, Т. И., Долганов, Д. В. (2014) Установка для измерения силы мышц бедра. *Медицинская техника*, № 1 (283), с. 27–30.
- Щуров, В. А., Долганова, Т. И., Долганов, Д. В. (2016) Установка для измерения силы мышц голени. *Медицинская техника*, № 2 (296), с. 37–39.
- Dallmeijer, A. J., Baker, R., Dodd, K. J., Taylor, N. F. (2011) Association between isometric muscle strength and gait joint kinetics in adolescents and young adults with cerebral palsy. *Gait & Posture*, vol. 33, no. 3, pp. 326–332. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2010.10.092>
- Darras, N., Nikaina, E., Tziomaki, M. et al. (2021) Development of lower extremity strength in ambulatory children with bilateral spastic cerebral palsy in comparison with typically developing controls using absolute and normalized to body weight force values. *Frontiers in Neurology*, vol. 12, article 617971. <https://doi.org/10.3389/fneur.2021.617971>
- Fosang, A., Baker, R. (2006) A method for comparing manual muscle strength measurements with joint moments during walking. *Gait & Posture*, vol. 24, no. 4, pp. 406–411. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2005.09.015>
- Moll, I., Essers, J. M. N., Marcellis, R. G. J. et al. (2022) Lower limb muscle fatigue after uphill walking in children with unilateral spastic cerebral palsy. *PLoS ONE*, vol. 17, no. 12, article e0278657. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0278657>
- Valadão, P., Piitulainen, H., Haapala, E. A. et al. (2021) Exercise intervention protocol in children and young adults with cerebral palsy: The effects of strength, flexibility and gait training on physical performance, neuromuscular mechanisms and cardiometabolic risk factors (EXECP). *BMC Sports Science, Medicine and Rehabilitation*, vol. 13, no. 1, article 17. <https://doi.org/10.1186/s13102-021-00242-y>

References

- Aksenov, A. Yu., Klishkovskaya, T. A. (2020) *Programma formirovaniya otcheta biomekhaniki khod'by cheloveka. Patent RU2020665238 [Program for the formation of a human walking biomechanics report. Patent RU2020665238].* Register date 24.11.2020. (In Russian)
- Dallmeijer, A. J., Baker, R., Dodd, K. J., Taylor, N. F. (2011) Association between isometric muscle strength and gait joint kinetics in adolescents and young adults with cerebral palsy. *Gait & Posture*, vol. 33, no. 3, pp. 326–332. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2010.10.092> (In English)
- Darras, N., Nikaina, E., Tziomaki, M. et al. (2021) Development of lower extremity strength in ambulatory children with bilateral spastic cerebral palsy in comparison with typically developing controls using absolute and normalized to body weight force values. *Frontiers in Neurology*, vol. 12, article 617971. <https://doi.org/10.3389/fneur.2021.617971> (In English)
- Dolganov, D. V., Dolganova, T. I., Samylov, V. V. (2018) Otsenka narushenij postural'noj funktsii pozvonochnika v ortostaticheskikh stereotipakh [Evaluation of postural function disorders of the spine in orthostatic stereotypes]. *Genij ortopedii*, vol. 24, no. 3, pp. 357–364. <https://doi.org/10.18019/1028-4427-2018-24-3-357-364> (In Russian)
- Dolganova, T. I., Popkov, D. A., Dolganov, D. V., Chibirov, G. M. (2022) Pokazateli kinetiki lokomotornykh stereotipov u zdorovykh detej v razlichnykh skorostnykh diapazonakh peredvizheniya [Indicators of the kinetics of locomotor stereotypes in healthy children in different speed ranges of movement]. *Genij ortopedii*, vol. 28, no. 3, pp. 417–424. <https://doi.org/10.18019/1028-4427-2022-28-3-417-424> (In Russian)
- Dolganova, T. I., Shchurova, E. N., Dolganov, D. V. et al. (2023) Lokomotornaya kinetika myshts nizhnikh konechnostej v norme i pri idiopatcheskom skolioze [Locomotor kinetics of the lower extremities in healthy individuals and idiopathic scoliosis]. *Vestnik Ural'skoj meditsinskoj akademicheskoy nauki — Journal of Ural Medical Academic Science*, vol. 20, no. 1-2, pp. 5–16. <https://doi.org/10.22138/2500-0918-2023-20-1-5-16> (In Russian)
- Fosang, A., Baker, R. (2006) A method for comparing manual muscle strength measurements with joint moments during walking. *Gait & Posture*, vol. 24, no. 4, pp. 406–411. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2005.09.015> (In English)
- Moll, I., Essers, J. M. N., Marcellis, R. G. J. et al. (2022) Lower limb muscle fatigue after uphill walking in children with unilateral spastic cerebral palsy. *PLoS ONE*, vol. 17, no. 12, article e0278657. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0278657> (In English)
- Petri, A., Sebin, K. (2021) *Naglyadnaya meditsinskaya statistika [Medical statistics at a glance].* 4th ed. Moscow: GEOTAR-Media Publ., 232 p. (In Russian)
- Samsonova, A. V. (2007) *Motornaya i sensornaya funktsiya myshts v biomekhanike lokomotsij [Motor and sensory function of muscles in the biomechanics of locomotion].* Saint Petersburg: The Lesgaft National State University of Physical Education, Sport and Health Publ., 152 p. (In Russian)
- Shchurov, V. A., Dolganova, T. I., Dolganov, D. V. (2014) Ustanovka dlya izmereniya sily myshts bedra [A femoral muscle dynamometer]. *Meditsinskaya tekhnika*, no. 1 (283), pp. 27–30. (In Russian)
- Shchurov, V. A., Dolganova, T. I., Dolganov, D. V. (2016) Ustanovka dlya izmereniya sily myshts goleni [Device for measuring lower leg muscle strength]. *Meditsinskaya tekhnika*, no. 2 (296), pp. 37–39. (In Russian)
- Valadão, P., Piitulainen, H., Haapala, E. A. et al. (2021) Exercise intervention protocol in children and young adults with cerebral palsy: The effects of strength, flexibility and gait training on physical performance, neuromuscular mechanisms and cardiometabolic risk factors (EXECF). *BMC Sports Science, Medicine and Rehabilitation*, vol. 13, no. 1, article 17. <https://doi.org/10.1186/s13102-021-00242-y> (In English)