

DOI: 10.38025/2078-1962-2020-98-4-26-34  
УДК 616.831 – 009.12 – 053.2 – 08: 615.847 + 615.825.6

## Влияние роботизированной механотерапии в различных комбинациях с неинвазивной электростимуляцией мышц и спинного мозга на постуральный баланс у детей с тяжелыми формами ДЦП

<sup>1</sup>Никитюк И.Е., <sup>1</sup>Кононова Е.Л., <sup>1,2</sup>Икоева Г.А., <sup>1</sup>Солохина И.Ю.

<sup>1</sup>Национальный медицинский исследовательский центр детской травматологии и ортопедии им. Г.И. Турнера Минздрава России, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup>Северо-Западный государственный медицинский университет им. И.И. Мечникова, Минздрава России, Санкт-Петербург, Россия

### Резюме

**Введение.** Постуральные расстройства носят выраженный характер при тяжелых формах детского церебрального паралича (ДЦП).

**Целью** работы явилось изучение влияния локомоторных тренировок в сочетании с чрескожной электрической стимуляцией спинного мозга (ЧЭССМ) и функциональной электростимуляцией мышц (ФЭС) нижних конечностей на восстановление функции поддержания вертикальной позы у детей с III уровнем ограничения двигательной активности по классификации GMFCS.

**Материал и методы.** Обследовано 20 больных ДЦП в возрасте от 8 до 12 лет. Пациенты основной группы (10 детей) получили 15 сеансов по 45 минут курса реабилитации в роботизированном тренажере «Локомат» в последовательности: 1) «Локомат» в сочетании с ФЭС, 2) «Локомат» в сочетании с ЧЭССМ, 3) «Локомат» в сочетании с ФЭС и ЧЭССМ. Интервалы между курсами составляли 6 месяцев. Пациентам из контрольной группы (10 детей) проводили только локомоторную тренировку.

**Результаты.** Динамику восстановления контроля вертикальной стойки у детей оценивали методом стабилотрии, который выявил активный отклик опорно-двигательной системы у пациентов основной группы только в случае сочетанного проведения роботизированной механотерапии и ФЭС. Это проявлялось в значимом увеличении амплитуды колебаний А центра давления, отчетливом нарастании дисперсии показателей параметра LFS, снижении силы корреляционной связи между параметрами LFS и А в сторону нормализации. Однако ни при какой комбинации локомоторных тренировок с ФЭС и ЧЭССМ не было выявлено убедительных признаков улучшения регуляции вертикальной позы.

**Заключение.** Высказывается предположение о необходимости многоуровневой нейростимуляции больных с ДЦП, которая может оказаться более эффективной, так как позволит воздействовать на центральные компоненты моторной активности.

**Ключевые слова:** детский церебральный паралич, Локомат, мышечная функциональная электростимуляция, чрескожная электростимуляция спинного мозга, стабилотрия.

**Для цитирования:** Никитюк И.Е., Кононова Е.Л., Икоева Г.А., Солохина И.Ю. Влияние роботизированной механотерапии в различных комбинациях с неинвазивной электростимуляцией мышц и спинного мозга на постуральный баланс у детей с тяжелыми формами ДЦП. Вестник восстановительной медицины. 2020; 98 (4): 26–34. <https://doi.org/10.38025/2078-1962-2020-98-4-26-34>

**Для корреспонденции:** Никитюк Игорь Евгеньевич, e-mail: femtotech@mail.ru.

**Статья получена:** 27.06.2020 **Статья принята к печати:** 10.07.2020 **Опубликована онлайн:** 30.08.2020

## Influence of Robotic Mechanotherapy in Various Combinations with Non-Invasive Electrostimulation of Muscles and Spinal Cord on the Postural Balance in Children with Severe Forms of Cerebral Palsy

<sup>1</sup>Nikityuk I.E., <sup>1</sup>Kononova E.L., <sup>1,2</sup>Ikoeva G.A., <sup>1</sup>Solokhina I.Yu.

<sup>1</sup>H.Turner National Medical Research Center for Children's Orthopedics and Trauma Surgery, Saint-Petersburg, Russian Federation

<sup>2</sup>North-Western State Medical University named after I.I. Mechnikov, Saint Petersburg, Russian Federation

### Abstract

**Introduction.** Postural disorders are significant in severe forms of cerebral palsy (CP).

**The aim** of the work was to study the effect of locomotor training in combination with transcutaneous electrical stimulation of the spinal cord and functional electrical stimulation (FES) of the muscles of the lower extremities on the restoration of the function of maintaining a vertical posture in children with III level of limitation of motor activity according to the GMFCS classification.

**Materials and methods.** 20 patients with CP at the age from 8 to 12 years old were examined. Patients of the main group (10 children) received 15 sessions of 45 minutes rehabilitation in the «Lokomat» robotic simulator in the sequence: 1) «Lokomat» in combination with FES, 2) «Lokomat» in combination with transcutaneous electrical stimulation of the spinal cord, 3) «Lokomat» in combination with FES and transcutaneous electrical stimulation of the spinal cord. The intervals between courses were 6 months. Patients from the control group (10 children) underwent only locomotor training.

**Results.** The dynamics of regaining control of the upright posture in children was evaluated by the method of stabilometry, which revealed the active response of the musculoskeletal system in patients of the main group only in the case of combined robotic mechanotherapy and FES. This was manifested in a significant increase in the amplitude of oscillations A of the pressure center, a clear increase in the variance of the parameters of the LFS parameter, and a decrease in the strength of the correlation between the parameters LFS and A towards normalization. However, with a combination of locomotor training with FES and transcutaneous electrical stimulation of the spinal cord, there were no convincing signs of improving the regulation of the vertical posture.

**Conclusion.** It is suggested that multilevel neurostimulation of patients with CP is necessary, which may be more effective, since it will affect the central components of motor activity.

**Keywords:** cerebral palsy, Lokomat, muscle functional electrical stimulation, transcutaneous spinal cord electrical stimulation, stabilometry.

**For citation:** Nikityuk I.E., Kononova E.L., Kioeva G.A., Solokhina I.Yu. Influence of Robotic Mechanotherapy in Various Combinations with Non-Invasive Electrostimulation of Muscles and Spinal Cord on the Postural Balance in Children with Severe Forms of Cerebral Palsy. Bulletin of rehabilitation medicine. 2020; 98(4): 26–34. <https://doi.org/10.38025/2078-1962-2020-98-4-26-34>

**Correspondence address:** Igor E. Nikityuk, e-mail: femtotech@mail.ru.

**Received:** Jun 27, 2020 **Accepted:** Jul 10, 2020 **Published online:** Aug 30, 2020

### Введение

Детский церебральный паралич (ДЦП) – тяжёлое нейроортопедическое заболевание, в основе патогенеза которого лежит повреждение головного мозга плода или новорожденного. Основными проявлениями ДЦП служат изменения мышечного тонуса, нарушения локомоторной функции, системы управления балансом тела, которые ведут к формированию патологических стереотипов позы и ходьбы, а также задержке формирования моторных навыков [1]. Важным направлением реабилитации детей с ДЦП является формирование у них новых двигательных навыков, способствующих улучшению вертикализации и самостоятельного передвижения [2]. Перспективным направлением в нейрореабилитации является роботизированная локомоторная терапия [3, 4], основанная на интенсивности и повторяемости движений у неврологических пациентов, которая также оказывает благотворное влияние на восстановление и улучшение осанки и опорно-двигательных функций больных ДЦП [5]. Однако сохраняется существенная проблема оценки динамики восстановления двигательной активности пациентов в процессе их реабилитации [6]. Использование роботизированной механотерапии при тяжелых формах ДЦП не выявило значимого клинического эффекта [7], доказательная база улучшения локомоций неполная [8], что позволяет некоторым авторам делать выводы о том, что роботизированное локомоторное обучение двигательным навыкам у больных церебральным параличом недостаточно эффективно [9]. Применение метода стабилометрии позволяет повысить качество диагностики результатов исследования для оценки эффективности медицинской реабилитации детей с постуральными нарушениями [10, 11]. Учитывая наличие у больных ДЦП значительного количества функционально ослабленных мышц, представляется актуальным применение допол-

нительно к остальным процедурам различных способов их электростимуляции.

В последние годы для усиления эффекта локомоторного тренинга используют функциональную электростимуляцию мышц (ФЭС) [12] и неинвазивную чрескожную электрическую стимуляцию спинного мозга (ЧЭССМ) [13]. Однако зачастую клинически значимые улучшения двигательных навыков после указанных комбинированных процедур выявлялись только у части пациентов с церебральным параличом [14, 15]. Кроме того, работы по изучению эффективности ФЭС и ЧЭССМ на фоне роботизированной механотерапии представлены единичными тематическими исследованиями, поэтому для более высокой точности сравнительной оценки электростимулирующих методик необходимо исследовать их на одной и той же группе детей с ДЦП.

**Цель исследования** – изучение влияния локомоторных тренировок в сочетании с ФЭС и ЧССМ на восстановление функции поддержания вертикальной позы у пациентов с тяжелыми формами ДЦП.

### Материал и методы

Проведено обследование 20 больных ДЦП в возрасте от 8 до 12 лет, с нарушениями контроля вертикальной позы при сохранной способности к самостоятельному удержанию вертикальной стойки до 2 минут. Все пациенты проходили реабилитацию в роботизированном тренажере «Локомат» (Носота, Швейцария). Курс состоял из 15 сеансов и проводился на протяжении трех недель. Каждый сеанс включал в себя 45 минут тренировки ходьбы в системе «Локомат» с использованием зрительной биологической обратной связи. Все пациенты были распределены на две группы.

Контрольная группа, состоящая из 10 детей (средний возраст  $9,9 \pm 0,51$  лет, уровень тяжести клинических про-

явлений ДЦП по классификации GMFCS [16] 3,1±0,19), получала тренировки ходьбы в локомоторном тренажере без дополнительной электростимуляции мышц.

Основная группа, состоящая также из 10 детей (средний возраст 10,7 ± 0,49 лет, уровень тяжести клинических проявлений ДЦП по классификации GMFCS 3,1±0,17), получала роботизированную механотерапию в сочетании с ФЭС и ЧЭССМ.

При проведении сеансов ФЭС стимуляцию мышц осуществляли монополярными импульсами длительностью 100 мкс и частотой 65 Гц, которые подавались в определенные фазы циклических движений нижних конечностей пациента. Стимулировали mm. longissimus thoracis, gluteus medius, gluteus maximus, quadriceps femoris, extensor digitorum longus et brevis, fibularis longus, tibialis anterior, extensor hallucis longus et brevis. Интенсивность сигнала подбирали перед каждым сеансом стимуляции индивидуально для каждой мышцы, до появления видимого сокращения мышцы, не допуская появления у ребенка неприятных ощущений.

Для проведения ЧЭССМ 2 круглых электрода (катоды) диаметром 2 см с токопроводящим адгезивным слоем размещали на коже по средней линии позвоночника между остистыми отростками позвонков T11-T12 и L1-L2. Анодами служили 2 овальных электрода 5×10 см<sup>2</sup>, которые размещали на коже над гребнями подвздошных костей. Стимуляция спинного мозга проводилась биполярными модулированными импульсами частотой 30 Гц, частота модуляции 10 кГц, длительность импульса – 1 мс. Интенсивность тока подбирали для каждого из двух уровней стимуляции в процессе процедуры, до появления сокращений мышц нижних конечностей или до появления неприятных ощущений у пациента (в этом случае интенсивность тока

уменьшали на 10%). Интенсивность тока обычно составляла 10–30 мА.

Пациенты основной группы получали курсы лечения в последовательности: 1) «Локомат» в сочетании с ФЭС, 2) «Локомат» в сочетании с ЧЭССМ, 3) «Локомат» в сочетании с ФЭС и ЧЭССМ. Интервалы между курсами составляли 6 месяцев. Стабилометрическое исследование проводили пациентам обеих групп в начале и в конце реабилитационного курса с использованием программно-аппаратного комплекса МБН «Биомеханика» (ООО НМФ «МБН», Россия). Для сравнения были определены нормативные значения стабилометрических показателей, полученных при дополнительном обследовании 10 здоровых детей того же возраста. Исследования осуществляли по стандартной функциональной пробе с открытыми (ОГ) и закрытыми глазами (ЗГ) с регистрацией параметров смещения центра давления (ЦД) тела. Вычисляли координаты смещения ЦД во фронтальной (X, мм) и в сагиттальной (Y, мм) плоскостях, среднюю длину траектории ЦД (L, мм), площадь статокинезиограммы S (мм<sup>2</sup>), отношение длины статокинезиограммы к ее площади LFS (мм<sup>-1</sup>), амплитуду колебаний центра давления A (мм), коэффициент Ромберга RC (%).

Статистическую обработку полученных данных осуществляли, используя компьютерные программы IBM SPSS Statistics 22 и Statgraphics Centurion 16.2. Так как в сравниваемых группах хотя бы в одной количественные признаки не соответствовали закону нормального распределения, для сравнения значений несвязанных выборок использовали U-критерий Манна-Уитни, а для внутригрупповых сравнений применяли W-критерий Уилкоксона. Данные представляли в виде медианы (Me) с межквартильным интервалом 25%–75% [Q<sub>1</sub>–Q<sub>2</sub>].

**Таблица 1.** Стабилометрические показатели здоровых детей и пациентов с ДЦП контрольной группы до и после механотерапии в системе «Локомат»

**Table 1.** Stabilometric indicators of healthy children and patients with cerebral palsy of the control group before and after mechanotherapy in the «Lokomat» system

Параметры / Parameters	Группы обследованных детей / Groups of children examined					p-value
	Здоровые дети / Healthy children Me [Q <sub>1</sub> – Q <sub>2</sub> ] n = 10	Дети с ДЦП контрольной группы / Children with cerebral palsy in the control group			p	
		«Локомат» / До «Lokomat» before Me [Q <sub>1</sub> – Q <sub>2</sub> ] n = 10		«Локомат» / После «Lokomat» after Me [Q <sub>1</sub> – Q <sub>2</sub> ] n = 10		
LFS, мм <sup>-1</sup> mm <sup>-1</sup>	ОГ	1,8 [1,3 – 2,0]	0,7 [0,5 – 1,1]	0,367	0,9 [0,3 – 1,3]	0,562
	ЗГ	1,6 [1,2 – 1,8]	0,8 [0,6 – 1,0]	0,910	0,9 [0,3 – 1,3]	0,142
A, мм mm	ОГ	2,3 [2,1 – 2,8]	4,9 [4,0 – 7,8]	0,367	4,9 [3,6 – 7,0]	<b>0,047</b>
	ЗГ	3,0 [2,4 – 3,6]	4,9 [4,5 – 6,3]	0,203	6,7 [4,0 – 7,7]	0,114
RC		121 [92 – 203]	94 [74 – 132]	0,759	109 [56 – 194]	<b>0,004</b>

**Примечание:** p – уровень значимости различий в группе до и после курса реабилитации (критерий Уилкоксона); p-value – уровень значимости различий между стандартными отклонениями в группе детей с ДЦП до и после лечения (F-критерий Фишера). ОГ – открытые глаза, ЗГ – закрытые глаза  
**Note:** p – level of significance of differences in the group before and after rehabilitation (Wilcoxon's criterion); p-value – level of significance of differences between standard deviations in the group of children with cerebral palsy before and after treatment (f-Fisher's criterion). ОГ – open eyes, ЗГ – closed eyes.

В основной группе больных, которые последовательно подвергались нескольким методам лечения, применяли дисперсионный анализ повторных измерений с использованием  $\chi^2$ -критерия Фридмана. Для сравнения дисперсий двух выборок использовали F-критерий Фишера (ANOVA). Для исследования взаимосвязи двух признаков применяли корреляционный анализ с использованием непараметрического коэффициента Спирмена  $r_s$ . Пороговый уровень статистической значимости принимался при значении критерия  $p < 0,05$ .

Исследование было проведено в соответствии с этическими стандартами, изложенными в Хельсинкской декларации. Все пациенты (их законные представители) были проинформированы и дали согласие до их включения в исследование.

## Результаты

Перед началом процедур контрольная и основная группы больных ДЦП были однородными по всем анализируемым характеристикам стадокинезиограмм. При этом по сравнению со здоровыми детьми в обеих группах пациентов определялись выраженные нарушения системы управления балансом тела. Это проявлялось существенным увеличением длины **L** и площади **S** стадокинезиограмм, а также средней амплитуды колебаний **A** центра давления. Кроме того, у всех пациентов было выявлено типичное смещение ЦД: латеральное – во фронтальной плоскости (ось **X**), и в большей степени вперед – в сагитальной плоскости (ось **Y**). Поквартильный анализ выявил тенденцию к снижению коэффициента Ромберга по сравнению со здоровыми детьми в обеих группах пациентов, также было установлено резкое снижение параметра **LFS**.

**Таблица 2.** Стабилометрические показатели детей с ДЦП основной группы до и после механотерапии в системе «Локомат» с последовательным сочетанием с ФЭС и с ЧЭССМ

**Table 2.** Stabilometric indicators of children with cerebral palsy of the main group before and after mechanotherapy in the "Lokomat" system with sequential combination with FES and transcutaneous electrical stimulation of the spinal cord

Процедуры / Procedures	Параметры / Parameters		Дети с ДЦП основной группы / Children with cerebral palsy of the main group			p-value
			До / Before Me [Q <sub>1</sub> – Q <sub>2</sub> ] n = 10	p	После / After Me [Q <sub>1</sub> – Q <sub>2</sub> ] n = 10	
Локомат + ФЭС/ Lokomat + ФЭС	LFS, мм <sup>-1</sup> mm <sup>-1</sup>	ОГ	0,5 [0,4 – 1,0]	0,485	0,6 [0,5 – 0,8]	0,053
		ЗГ	0,8 [0,4 – 1,5]	0,312	0,6 [0,5 – 1,0]	0,002
	A, Мм mm	ОГ	6,0 [4,8 – 7,4]	0,047	6,9 [6,5 – 11,0]	0,036
		ЗГ	5,7 [3,9 – 7,5]	0,059	7,9 [6,3 – 9,2]	0,949
	RC		116 [55 – 129]	0,485	98 [78 – 112]	0,351
Локомат + ЧЭССМ/ Lokomat + ЧЭССМ	LFS, мм <sup>-1</sup> mm <sup>-1</sup>	ОГ	0,6 [0,3 – 0,8]	0,395	0,6 [0,5 – 0,7]	0,367
		ЗГ	0,8 [0,5 – 1,1]	0,425	0,8 [0,5 – 1,1]	0,0004
	A, Мм mm	ОГ	6,5 [4,7 – 10,3]	0,284	6,7 [2,7 – 10,0]	0,378
		ЗГ	6,0 [4,5 – 7,2]	0,483	6,2 [4,5 – 8,4]	0,475
	RC		77 [70 – 97]	0,311	76 [55 – 110]	0,356
Локомат+ФЭС+ЧЭССМ / Lokomat+ФЭС+ЧЭССМ	LFS, мм <sup>-1</sup> mm <sup>-1</sup>	ОГ	0,5 [0,3 – 1,1]	0,278	0,7 [0,4 – 1,0]	0,133
		ЗГ	0,5 [0,5 – 1,5]	0,440	0,6 [0,5 – 1,2]	0,003
	A, Мм mm	ОГ	7,0 [3,7 – 7,5]	0,163	5,8 [3,1 – 6,7]	0,493
		ЗГ	5,6 [3,0 – 8,4]	0,325	7,9 [4,7 – 8,1]	0,671
	RC		78 [52 – 128]	0,248	130 [52 – 142]	0,019

**Примечание:** p – уровень значимости различий в группе до и после курса реабилитации (критерий Уилкоксона); p-value – уровень значимости различий между стандартными отклонениями в основной группе детей с ДЦП до и после лечения (F-критерий Фишера).

ОГ – открытые глаза, ЗГ – закрытые глаза, ФЭС – функциональная электромиостимуляция; ЧЭССМ – чрескожная электростимуляция спинного мозга.

**Note:** p – level of significance of differences in the group before and after rehabilitation (Wilcoxon's criterion); p-value – level of significance of differences between standard deviations in the main group of children with cerebral palsy before and after treatment (F-Fisher's criterion).

ОГ – open eyes, ЗГ – closed eyes, ФЭС – functional electromyostimulation; ЧЭССМ – transcutaneous electrical stimulation of the spinal cord.



Таким образом, исходно в контрольной и основной группах больных ДЦП вертикальный баланс характеризовался гипостабильностью.

Результаты оценки количественных параметров стабиллометрии, полученные после курса двигательной реабилитации пациентов обеих групп с позиций описательной статистики, представлены в таблицах 1–2. В таблицы не были включены параметры, показатели которых значимо не изменились по сравнению с исходными до лечения: значения координат **X** и **Y**, длина траектории центра давления **L** и площадь статокинезиограммы **S**.

Из таблицы 1 видно, что в контрольной группе пациентов после локомоторной терапии не было выявлено значимых отличий показателей параметров **LFS**, **A** и **RC** от исходных значений. При этом наблюдался значимый разброс значений параметра **A** при открытых глазах при сохранности медианных и квартильных значений. В то же время при незначимом увеличении в сторону нормализации медианных значений **RC** произошло резкое нарастание дисперсии, что указывает на появление патологически сниженных показателей **RC**.

В основной группе больных ДЦП (табл. 2) наибольшие изменения параметров стабиллометрии были выявлены после прохождения механотерапии в сочетании с ФЭС. Это проявлялось в значимом увеличении от исходных значений параметра **A** при открытых и закрытых глазах, а также резком нарастании дисперсии показателей параметра **LFS** как при открытых, так и закрытых глазах. Менее существенные изменения параметров стабиллометрии произошли после локомоторной терапии в сочетании с ФЭС и ЧЭССМ, которые затронули параметр **LFS** при закрытых глазах (только значимое увеличение дисперсии) и параметр **RC**, дисперсия показателей которого указывает на тенденцию к увеличению коэффициента Ромберга в сторону нормализации. Самый незначительный отклик системы вертикального баланса был выявлен после локомоторного тренинга в сочетании с ЧЭССМ, анализ которого показал только значимое нарастание

после процедур дисперсии показателей параметра **LFS** при закрытых глазах.

Применение дисперсионного анализа повторных измерений (критерий Фрийдмана) позволил сравнить эффективность различных способов электростимуляции при локомоторной механотерапии основной группы детей с ДЦП (табл. 3).

Из таблицы 3 следует, что ни у одного из параметров **LFS**, **A** и **RC** показатель асимптотической значимости не приблизился к уровню 0,05. Таким образом, различия между параметрами стабиллометрии после различных способов реабилитации больных церебральным параличом основной группы оказались статистически незначимыми ( $p > 0,05$ ).

Проведенный корреляционно-регрессионный анализ позволил изучить зависимость параметра **LFS** статокинезиограмм больных церебральным параличом от амплитуды колебаний **A** центра давления при различных способах лечения (табл. 4).

У здоровых детей при открытых глазах связь между параметрами **LFS** и **A** была обратная, довольно слабая:  $-0,44$  ( $p=0,148$ ), а при закрытых – значимая, приближающаяся к сильной:  $-0,63$  ( $p=0,028$ ). У пациентов с ДЦП обеих групп перед курсом реабилитации выявлена сильная обратная связь между указанными параметрами, независимо от зрительной афферентации (рис. 1а). После курса двигательной реабилитации снижение корреляции между параметрами **LFS** и **A** в сторону нормализации было выявлено только при закрытых глазах после механотерапии в сочетании с ФЭС (рис. 1б). После локомоторного тренинга с другими способами электростимуляции, а также без нее, сохранялась патологически высокая связь **LFS** ~ **A**.

Выявленная у больных с церебральным параличом перед курсом механотерапии сильная корреляционная связь между параметрами **LFS** и **A** может указывать на более упорядоченную траекторию ЦД и, следовательно, более высокую синхронизированность системы управления вертикальным балансом тела. Такая высокая упорядоченность траектории ЦД характерна для детей с тяжелой

**Таблица 3.** Сравнительная оценка стабиллометрических показателей пациентов основной группы, прошедших последовательно курсы механотерапии в системе «Локомат» в сочетании с различными способами электростимуляции (критерий Фрийдмана)

**Table 3.** Comparative assessment of stabilometric indicators of patients of the main group who have successively undergone courses of mechanotherapy in the «LOKOMAT» system in combination with various methods of electrical stimulation (Friedman's criterion)

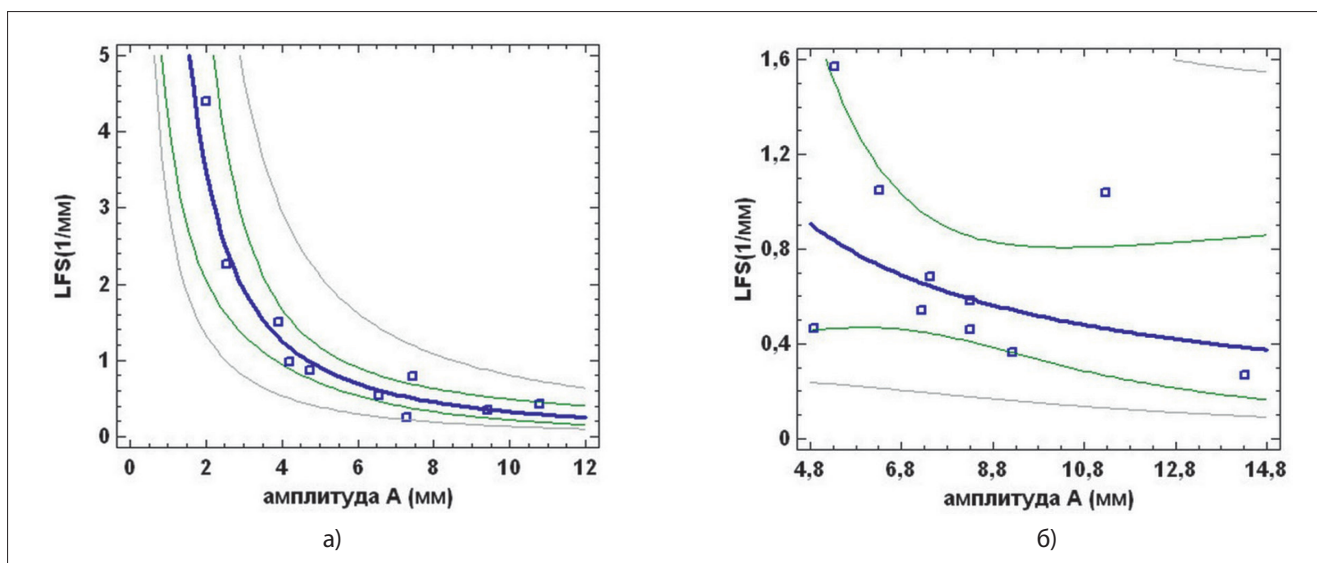
Ряды / Ranges	Средний ранг / Average rank				
	LFS		A		RC
	ОГ	ЗГ	ОГ	ЗГ	
Локомат + ФЭС / Lokomat + ФЭС (n = 10)	1,8	1,7	2,5	2,5	2,1
Локомат + ЧЭССМ / Lokomat + ЧЭССМ (n = 10)	1,9	2,2	1,9	1,9	1,8
Локомат + ФЭС + ЧССМ / Lokomat + ФЭС + ЧССМ (n = 10)	2,3	2,1	1,6	1,6	2,1
Асимптотическая значимость / Asymptotic significance	0,497	0,497	0,122	0,122	0,741

**Примечание:** ОГ – тест с открытыми глазами, ЗГ – тест с закрытыми глазами

**Note:** OG – test with open eyes, ZG – test with closed eyes, ФЭС – functional electromyostimulation, ЧЭССМ – transcutaneous electrical stimulation of the spinal cord.

**Таблица 4.** Корреляционные связи между параметрами статокинезиограмм LFS и A у детей с ДЦП в зависимости от способа лечения**Table 4.** Correlations between the parameters of statokinesiograms LFS and A in children with cerebral palsy depending on the treatment method

Способ лечения детей с ДЦП / Treatment method children with cerebral palsy		Зависимость LFS ~ A / Relation LFS ~ A			
		До лечения / Before treatment		После лечения / After treatment	
		Коэффициент корреляции / Correlation coefficient $r_s$	$p$	Коэффициент корреляции / Correlation coefficient $r_s$	$p$
Локомат / Lokomat (n = 10)	ОГ	-0,82	0,004	-0,80	0,007
	ЗГ	-0,92	0,0001	-0,82	0,006
Локомат + ФЭС / Lokomat + ФЭС (n = 10)	ОГ	-0,92	0,0001	-0,92	0,0002
	ЗГ	-0,93	0,0001	-0,48	0,163
Локомат + ЧЭССМ / Lokomat + ЧЭССМ (n = 10)	ОГ	-0,92	0,0001	-0,82	0,004
	ЗГ	-0,81	0,004	-0,87	0,001
Локомат + ФЭС и ЧЭССМ / Lokomat + ФЭС + ЧЭССМ (n = 10)	ОГ	-0,85	0,002	-0,93	0,0001
	ЗГ	-0,91	0,0003	-0,91	0,0002

**Примечание:** ОГ – тест с открытыми глазами, ЗГ – тест с закрытыми глазами; $p$  – достигнутый уровень значимости полученной оценки коэффициента корреляции**Note:** ОГ – test with open eyes, ЗГ – test with closed eyes,  $p$  – the achieved level of significance of the obtained correlation coefficient estimation, ФЭС – functional electromyostimulation; ЧЭССМ – transcutaneous electrical stimulation of the spinal cord.**Рис. 1.** Линия регрессии (жирная) и ее доверительный интервал (тонкие линии) для зависимости параметра LFS статокинезиограмм от амплитуды колебаний A у детей с ДЦП основной группы в тесте с закрытыми глазами: а) до механотерапии в сочетании с ФЭС; б) после механотерапии в сочетании с ФЭС.**Fig. 1.** Regression line (bold) and its confidence interval (thin lines) for the dependence of the LFS ( $\text{mm}^{-1}$ ) parameter of statokinesiograms on the range of variability A (mm) in children with CP of the main group in the test with closed eyes: a) before mechanotherapy in combination with FES; b) after mechanotherapy in combination with FES.

формой ДЦП и считается патологической [17], так как повышенную синхронизированность системы постурального контроля расценивают как динамический показатель ее дефицита [18]. В связи с этим можно констатировать, что в основной группе пациентов после курса механотерапии в сочетании с ФЭС нарушения постурального контроля стали менее выраженными.

### Обсуждение

Хорошо известно, что роботизированная механотерапия способствует моторному обучению детей с тяжелой формой ДЦП [19] и улучшению паттерна его ходьбы [20]. Однако улучшение постурального контроля, как ведущего признака двигательной функции у больных с церебральным параличом, было выявлено, преимущественно, при

заболеваниях легкой и средней степенях тяжести [21]. Поэтому, несмотря на широкое использование роботизированных технологий в нейрореабилитации, их реальные возможности до конца все еще не определены. Проведение модифицированных исследований, направленных на изучение эффективности механотерапии в комбинации с ФЭС [22] и ЧЭССМ [23], выявило улучшение двигательных навыков у детей с ДЦП, но не учло влияния реабилитационных процедур на вертикальный баланс.

В настоящем исследовании использование различных комбинаций методов электростимуляции при локомоторном тренинге больных ДЦП имело целью воздействовать на разные уровни кинематических цепей и механизмы организации движения пациентов. Существует мнение, что электростимуляция, синхронизированная с шагательным рефлексом, создает интенсивную дополнительную афферентацию и способствует улучшению контроля вертикального баланса [24]. Однако по данным настоящей работы не было выявлено убедительных признаков улучшения регуляции вертикальной позы у детей с тяжелыми формами ДЦП после локомоторных тренировок и с различными способами электростимуляции.

Использование различных статистических методов выявило, что только в случае комбинации роботизированной механотерапии и ФЭС следует активный отклик опорно-двигательной системы пациентов на внешнюю реконструкцию ходьбы с использованием программируемой электростимуляции. Это проявлялось в значимом увеличении амплитуды колебаний А центра давления, резком нарастании дисперсии показателей параметра LFS, снижение корреляции между параметрами LFS и А в сторону нормализации. Вполне возможно, что импульсы, инициируемые воздействием ФЭС на группы скелетных мышц, могут являться пусковым механизмом для активации у больных церебральным параличом кинематических цепей, участвующих в постуральном контроле. Однако в обследованной группе пациентов это не привело к повышению стабильности баланса. Дополнительная чрескожная электрическая стимуляция спинного мозга при локомоторном тренинге в этой же группе пациентов не привела к нормализации показателей стабиллометрических тестов. Это может указывать на отсутствие оптимизации общего афферентного притока за счет интеграции ритмической проприоцепции, обусловленной пассивными шаговыми движениями и афферентацией, индуцированной ФЭС и

ЧЭССМ, что предполагает сохранение патологической постуральной стратегии. Необходимо учитывать, что ФЭС и ЧЭССМ не могут оказать воздействие на вышележащие церебральные структуры, ответственные за контроль вертикальной позы, патофизиологические механизмы которых до конца еще не выяснены [25]. Кроме того, постуральный контроль включен в процессы, обеспечивающие пространственную ориентацию и формирование схемы тела при различной афферентации. Когнитивная информация является основополагающей для поддержания вертикальной позы и запускается для выполнения упреждающей постуральной регулировки с целью достижения оптимального целенаправленного баланса тела [26]. Поэтому продолжаются поиски методов многоуровневой нейростимуляции больных с ДЦП, позволяющих воздействовать на все компоненты моторной активности: центральные (корковые), подкорковые (базальные ганглии, мозжечок, ствол мозга), центры спинного мозга [27, 28]. Вполне возможно, это будет способствовать более эффективной активации не только мышечного контроля, но и сложной сенсомоторной функции равновесия.

Таким образом, вследствие многоуровневой организации локомоторных нейросетей человека, обеспечивающих вертикальный баланс, сохраняются нерешенные вопросы о методах воздействия на них, требующие поиска путей дальнейшего развития методологии электростимуляции.

#### Заключение

Не было выявлено убедительных признаков улучшения регуляции вертикальной позы у детей с тяжелыми формами ДЦП после локомоторных тренировок в сочетании с функциональной электромиостимуляцией нижних конечностей и чрескожной электростимуляцией спинного мозга. Только в случае комбинации роботизированной механотерапии и ФЭС следует активный отклик опорно-двигательной системы пациентов, проявляющийся в изменении отдельных стабиллометрических параметров. Вследствие тяжести патологии и грубого нарушения баланса тела у детей с церебральным параличом в программе реабилитации необходимо предусматривать возможность расширения зоны воздействия – многоуровневой нейростимуляции, которая может оказаться более эффективной, так как позволяет воздействовать на центральные компоненты моторной активности.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Novak I, Morgan C., Adde L., Blackman J. Early, accurate diagnosis and early intervention in cerebral palsy: advances in diagnosis and treatment. *JAMA Pediatrics*. 2017; 171(9): 897–907. DOI:10.1001/jamapediatrics.2017.1689.
- van Vulpen L.F., de Groot S., Rameckers E., Becher J.G., Dallmeijer A.J. Improved walking capacity and muscle strength after functional power-training in young children with cerebral palsy. *Neurorehabilitation and Neural Repair*. 2017; 31(9): 827–841. DOI: 10.1177/1545968317723750.
- Белова А.Н., Борзиков В.В., Кузнецов А.Н., Рукина Н.Н. Роботизированные устройства в нейрореабилитации: состояние вопроса. *Вестник восстановительной медицины*. 2018; (2): 94–107.
- Святская Е.Ф., Бийкузиева А. А., Ахмедова Д.Ш. Роль роботизированной механотерапии в восстановлении мобильности у пациентов, перенесших острое нарушение мозгового кровообращения. *Вестник восстановительной медицины*. 2020; (1): 31–35.
- Wallard L., Dietrich G., Kerlirzin Y., Bredin J. Effect of robotic-assisted gait rehabilitation on dynamic equilibrium control in the gait of children with cerebral palsy. *Gait & Posture*. 2018; (60): 55–60. DOI: 10.1016/j.gaitpost.2017.11.007.
- Иванова Г.Е., Ишутин Д.В., Герцик Ю.Г., Ишутина Р.Ш., Герцик Г.Я. К вопросу оценки состояния и перспектив применения принципов биомеханики движений в разработке импортозамещающих изделий и технологий медицинской реабилитации. *Вестник восстановительной медицины*. 2017; (2): 36–42.
- Borggraeve I., Schaefer J.S., Klaiiber M., Dabrowski E., Ammann-Reiffer C., Knecht B., Berweck S., Heinen F., Meyer-Heim A. Robotic assisted treadmill therapy improves walking and standing performance in children and adolescents with cerebral palsy. *European Journal of Paediatric Neurology*. 2010; 14(6): 496–502. DOI: 10.1016/j.ejpn.2010.01.002.
- Ammann-Reiffer C., Bastiaenen C.H.G., Meyer-Heimand A.D., van Hedel H.J.A. Effectiveness of robot-assisted gait training in children with cerebral palsy: a bicenter, pragmatic, randomized, cross-over trial (PeLoGAIT). *BMC Pediatrics*. 2017; (17): 64 p. DOI: 10.1186/s12887-017-0815-y.
- Aurich-Schuler T., Grob F., van Hedel H.J.A., Labruyère R. Can Lokomat therapy with children and adolescents be improved? An adaptive clinical pilot trial comparing Guidance force, Path control, and FreeD. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*. 2017; 14(1): 76 p. DOI: 10.1186/s12984-017-0287-1.
- Аброськина М.В., Прокопенко С.В., Ондар В.С., Кайгородцева С.А., Гасымлы Э.Д. Коррекция стереотипа ходьбы у больных с синдромом центрального гемипареза методом активизации заднего толчка стопы. *Вестник восстановительной медицины*. 2015; (1): 14–18.

11. Нигамадьянов Н.Р., Цыкунов М.Б., Лукьянов В.И., Иванова Г.Е. Исследование показателей баллистогаммы вертикальной стойки методом компьютерной стабилометрии у детей с ортопедической патологией. Вестник восстановительной медицины. 2018; (4): 14–20.
12. Moll I., Vles J.S.H., Soudant D.L.H.M., Witlox A.M.A., Staal H.M., Speth L.A.W.M., Janssen-Potten Y.J.M., Coenen M., Koudijs S.M., Vermeulen R.J. Functional electrical stimulation of the ankle dorsiflexors during walking in spastic cerebral palsy: a systematic review. *Developmental Medicine & Child Neurology*. 2017; 59(12): 1230–1236. DOI:10.1111/dmcn.13501.
13. Икоева Г.А., Никитюк И.Е., Кивоенко О.И., Мошонкина Т.Р., Солопова И.А., Сухотина И.А., Виссарионов С.В., Умнов В.В., Герасименко Ю.П. Клинико-неврологическая и нейрофизиологическая оценка эффективности двигательной реабилитации у детей с церебральным параличом при использовании роботизированной механотерапии и чрескожной электрической стимуляции спинного мозга. Ортопедия, травматология и восстановительная хирургия детского возраста. 2016; 4(4): 47–55. DOI: 10.17816/PTORS4447–55
14. Postans N.J., Granat M.H. Effect of functional electrical stimulation, applied during walking, on gait in spastic cerebral palsy. *Developmental Medicine & Child Neurology*. 2005; 47(1): 46–52. DOI:10.1017/s0012162205000083.
15. Никитюк И.Е., Мошонкина Т.Р., Щербакова Н.А., Виссарионов С.В., Умнов В.В., Рождественский В.Ю., Герасименко Ю.П. Влияние локомоторной тренировки и функциональной электромиостимуляции на поструральные функции детей с тяжелыми формами ДЦП. Физиология человека. 2016; 42(3): 37–46. DOI: 10.7868/S0131164616030127.
16. Palisano R., Rosenbaum P.L., Walter S.D., Russell D., Wood E.P., Galuppi B.E. Development and reliability of a system to classify gross motor function in children with cerebral palsy. *Developmental Medicine & Child Neurology*. 1997; (39): 214–223. DOI:10.1111/j.1469–8749.1997.tb07414.x.
17. Никитюк И.Е., Икоева Г.А., Кивоенко О.И. Система управления вертикальным балансом у детей с церебральным параличом более синхронизирована по сравнению со здоровыми детьми. Ортопедия, травматология и восстановительная хирургия детского возраста. 2017; 5(3): 49–57. DOI: 10.17816/PTORS5349–57.
18. Donker S.F., Ledebt A., Roerdink M. Children with cerebral palsy exhibit greater and more regular postural sway than typically developing children. *Experimental Brain Research*. 2008; (184): 363–370. DOI: 10.1007/s00221–007–1105-y.
19. Hilderley A.J., Fehlings D., Lee G.W., Wright F.V. Comparison of a robotic-assisted gait training program with a program of functional gait training for children with cerebral palsy: design and methods of a two group randomized controlled cross-over trial. SpringerPlus. 2016; (5): 1886 p. DOI: 10.1186/s40064–016–3535–0.
20. Макарова М.Р., Лядов К.В., Турова Е.А., Кочетков А.В. Возможности современной механотерапии в коррекции двигательных нарушений неврологических больных. Вестник восстановительной медицины. 2014; (1): 54–62.
21. Grecco L.A.C., Tomita S.M., Christovao T.C.L., Pasini H., Sampaio L.M.M., Oliveira C.S. Effect of treadmill gait training on static and functional balance in children with cerebral palsy: a randomized controlled trial. *Brazilian Journal of Physical Therapy*. 2013; 17(1): 17–23. DOI:10.1590/s1413–35552012005000066.
22. Chiu H. C., Ada L. Effect of functional electrical stimulation on activity in children with cerebral palsy: A systematic review. *Pediatric Physical Therapy*. 2014; 26(3): 283–288. DOI:10.1097/PEP.0000000000000045.
23. Solopova I.A., Sukhotina I.A., Zhvansky D.S., Ikoeva G.A., Vissarionov S.V., Baidurashvili A.G., Edgerton V.R., Gerasimenko Y.P., Moshonkina T.R. Effects of spinal cord stimulation on motor functions in children with cerebral palsy. *Neuroscience Letters*. 2017; (639): 192–198. DOI:10.1016/j.neulet.2017.01.003.
24. Петрушанская К.А., Витензон А.С. Восстановительное лечение больных детским церебральным параличом посредством функциональной электростимуляции мышц при ходьбе. Журнал неврологии и психиатрии. 2009; (1): 27–34.
25. Takakusaki K., Chiba R., Nozu T., Okumura T. Brainstem control of locomotion and muscle tone with special reference to the role of the mesopontine tegmentum and medullary reticulospinal systems. *Journal of Neural Transmission*. 2016; 123(7): 695–729. DOI:10.1007/s00702–015–1475–4.
26. Takakusaki K. Functional neuroanatomy for posture and gait control. *Journal of Movement Disorders*. 2017; 10(1): 1–17. DOI:10.14802/jmd.16062.
27. Игнатова Т.С., Скоромец А.П., Колбин В.Е., Сарана А.М., Щербак С.Г., Макаренко С.В., Дейнеко В.В., Данилов Ю.П. Транслингвальная нейростимуляция головного мозга в лечении детей с церебральным параличом. Вестник восстановительной медицины. 2016; (6): 10–16.
28. Игнатова Т.С., Икоева Г.А., Колбин В.Е., Сарана А.М., Щербак С.Г., Волков В.Г., Калинин Л.П., Скоромец А.П., Данилов Ю.П. Оценка эффективности транслингвальной нейростимуляции в двигательной реабилитации у детей со спастической диплегией. Ортопедия, травматология и восстановительная хирургия детского возраста. 2019; 7(2): 17–24. DOI:10.17816/PTORS7217–24.

## REFERENCES

1. Novak I., Morgan C., Adde L., Blackman J. Early, accurate diagnosis and early intervention in cerebral palsy: advances in diagnosis and treatment. *JAMA Pediatrics*. 2017; 171(9): 897–907. DOI:10.1001/jamapediatrics.2017.1689
2. van Vulpen L.F., de Groot S., Rameckers E., Becher J.G., Dallmeijer A.J. Improved walking capacity and muscle strength after functional power-training in young children with cerebral palsy. *Neurorehabilitation and Neural Repair*. 2017; 31(9): 827–841. DOI: 10.1177/1545968317723750
3. Belova A.N., Borzikov V.V., Kuznetsov A.N., Rukina N.N. Robotizirovannye ustroystva v neyroreabilitatsii: sostoyanie voprosa [Robotic devices in neurorehabilitation: Review]. *Bulletin of Restorative Medicine*. 2018; (2): 94–107 (In Russ.).
4. Svyatskaya E.F., Biykuzieva A.A., Ahmedova D.S. Rol' robotizirovannoy mekhanoterapii v vosstanovlenii mobil'nosti u patsientov, perenesших ostroe narushenie mozgovogo krovoobrashcheniya [The role of robotic mechanotherapy in mobility restoration in patients with acute cerebrovascular accident]. *Bulletin of Restorative Medicine*. 2020; (1): 31–35 (In Russ.).
5. Wallard L., Dietrich G., Kerlirzin Y., Bredin J. Effect of robotic-assisted gait rehabilitation on dynamic equilibrium control in the gait of children with cerebral palsy. *Gait & Posture*. 2018; (60): 55–60. DOI:10.1016/j.gaitpost.2017.11.007
6. Ivanova G.E., Ishutin D.V., Gertsik Y.G., Ishutina R.Sh., Gertsik G.Y. K voprosu otsenki sostoyaniya i perspektiv primeneniya printsipov biomehaniki dvizheniy v razrabotke importozameshchayushchikh izdeliy i tekhnologiy meditsinskoj reabilitatsii [On assessment of status and prospects of movements biomechanics principles application in development of import-substituting products and technologies for medical rehabilitation]. *Bulletin of Restorative Medicine*. 2017; (2): 36–42 (In Russ.).
7. Borggraefe I., Schaefer J.S., Klaiber M., Dabrowski E., Ammann-Reiffer C., Knecht B., Berweck S., Heinen F., Meyer-Heim A. Robotic assisted treadmill therapy improves walking and standing performance in children and adolescents with cerebral palsy. *European Journal of Paediatric Neurology*. 2010; 14(6): 496–502. DOI:10.1016/j.ejpn.2010.01.002
8. Ammann-Reiffer C., Bastiaenen C.H.G., Meyer-Heimand A.D., van Hedel H.J.A. Effectiveness of robot-assisted gait training in children with cerebral palsy: a bicenter, pragmatic, randomized, cross-over trial (PeLoGait). *BMC Pediatrics*. 2017; (17): 64 p. DOI:10.1186/s12887–017–0815-y.
9. Aurich-Schuler T., Grob F., van Hedel H.J.A., Labruyère R. Can Lokomat therapy with children and adolescents be improved? An adaptive clinical pilot trial comparing Guidance force, Path control, and FreeD. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*. 2017; 14(1): 76 p. DOI:10.1186/s12984–017–0287–1
10. Abroskina M.Y., Prokopenko S.V., Ondar V.S., Kaigorodtseva S.S., Gasymlly E.D. Korrektsiya stereotipa khod'by u bol'nykh s sindromom tsentral'nogo gemipareza metodom aktivatsii zadnego tolchka stopy [Correction of the gait stereotype in patients with the syndrome of central hemiparesis by the method of activation of the posterior foot impulse]. *Bulletin of Restorative Medicine*. 2015; (1): 14–18 (In Russ.).
11. Nigamadyanov N.R., Tsykunov M.B., Lukyanov V.I., Ivanova G.E. Issledovanie pokazateley ballistogrammy vertikal'noy stoyki metodom komp'yuternoy stabilometrii u detey s ortopedicheskoy patologiyey [A study of indicators of ballistograms upright using computer stabilometry in children with orthopedic pathology]. *Bulletin of Restorative Medicine*. 2018; (4): 14–20 (In Russ.).
12. Moll I., Vles J.S.H., Soudant D.L.H.M., Witlox A.M.A., Staal H.M., Speth L.A.W.M., Janssen-Potten Y.J.M., Coenen M., Koudijs S.M., Vermeulen R.J. Functional electrical stimulation of the ankle dorsiflexors during walking in spastic cerebral palsy: a systematic review. *Developmental Medicine & Child Neurology*. 2017; 59(12): 1230–1236. DOI:10.1111/dmcn.13501.
13. Ikoeva G.A., Nikityuk I.E., Kivoenok O.I., Vissarionov S.V., Umnov V.V., Moshonkina T.R., Sukhotina I.A., Gerasimenko Y.P., Solopova I.A. Kliniko-nevrologicheskaya i neyrofiziolicheskaya otsenka effektivnosti dvigatel'noy reabilitatsii u detey s tserebral'nym paralichom pri ispol'zovanii



- robotizirovannoy mekhanoterapii i chreskozhoznoy elektricheskoy stimulyatsii spinnogo mozga [Clinical, neurological, and neurophysiological evaluation of the efficiency of motor rehabilitation in children with cerebral palsy using robotic mechanotherapy and transcutaneous electrical stimulation of the spinal cord]. *Pediatric traumatology, orthopaedics and reconstructive surgery*. 2016; 4(4): 47–55. DOI:10.17816/PTORS4447–55 (In Russ.).
14. Postans N.J., Granat M.H. Effect of functional electrical stimulation, applied during walking, on gait in spastic cerebral palsy. *Developmental Medicine & Child Neurology*. 2005; 47(1): 46–52. DOI:10.1017/s0012162205000083.
  15. Nikityuk I.E., Moshonkina T.R., Shcherbakova N.A., Vissarionov S.V., Umnov V.V., Rozhdestvenskii V.Y., Gerasimenko Y.P. Vliyanie lokomotornoy trenirovki i funktsional'noy elektromiostimulyatsii na postural'nye funktsii detey s tyazhelymi formami DTsP [Effects of locomotor training and functional electrical stimulation on postural function in children with severe cerebral palsy]. *Human Physiology*. 2016; 42(3): 37–46. DOI:10.7868/S0131164616030127 (In Russ.).
  16. Palisano R., Rosenbaum P.L., Walter S.D., Russell D., Wood E.P., Galuppi B.E. Development and reliability of a system to classify gross motor function in children with cerebral palsy. *Developmental Medicine and Child Neurology*. 1997; (39): 214–223. DOI:10.1111/j.1469-8749.1997.tb07414.x
  17. Nikityuk I.E., Ikoeva G.A., Kivoenko O.I. Sistema upravleniya vertikal'nym balansom u detey s tserebral'nym paralichom bolee sinkhronizirovana po sravneniyu so zdorovymi det'mi [The vertical balance management system is more synchronized in children with cerebral paralysis than in healthy children]. *Pediatric traumatology, orthopaedics and reconstructive surgery*. 2017; 5(3): 49–57. DOI:10.17816/PTORS5349–57 (In Russ.).
  18. Donker S.F., Ledebt A., Roerdink M. Children with cerebral palsy exhibit greater and more regular postural sway than typically developing children. *Experimental Brain Research*. 2008; (184): 363–370. DOI:10.1007/s00221-007-1105-y
  19. Hilderley A.J., Fehlings D., Lee G.W., Wright F.V. Comparison of a robotic-assisted gait training program with a program of functional gait training for children with cerebral palsy: design and methods of a two group randomized controlled cross-over trial. *SpringerPlus*. 2016; (5): 1886 p. DOI:10.1186/s40064-016-3535-0.
  20. Makarova M.R., Liadov K.V., Turova E.A., Kochetkov A.V. Vozmozhnosti sovremennoy mekhanoterapii v korrektsii dvigatel'nykh narusheniy nevrologicheskikh bol'nykh [Possibilities of modern mechanical therapy in the correction of motor disorders of neurological patients]. *Bulletin of Restorative Medicine*. 2014; (1): 54–62 (In Russ.).
  21. Grecco L.A.C., Tomita S.M., Christovao T.C.L., Pasini H., Sampaio L.M.M., Oliveira C.S. Effect of treadmill gait training on static and functional balance in children with cerebral palsy: a randomized controlled trial. *Brazilian Journal of Physical Therapy*. 2013; 17(1): 17–23. DOI:10.1590/s1413-35552012005000066.
  22. Chiu H. C., Ada L. Effect of functional electrical stimulation on activity in children with cerebral palsy: A systematic review. *Pediatric Physical Therapy*. 2014; 26(3): 283–288. DOI:10.1097/PEP.0000000000000045.
  23. Solopova I.A., Sukhotina I.A., Zhvansky D.S., Ikoeva G.A., Vissarionov S.V., Baidurashvili A.G., Edgerton V.R., Gerasimenko Y.P., Moshonkina T.R. Effects of spinal cord stimulation on motor functions in children with cerebral palsy. *Neuroscience Letters*. 2017; (639): 192–198. DOI:10.1016/j.neulet.2017.01.003.
  24. Petrushanskaya K.A., Vitenzon A.S. Vosstanovitel'noe lechenie bol'nykh detskim tserebral'nym paralichom posredstvom funktsional'noy elektrostimulyatsii myshts pri khod'be [Rehabilitation treatment of patients with children cerebral palsy using functional muscle electrostimulation during gait]. *Zhurnal nevrologii i psikiatrii*. 2009; (1): 27–34 (In Russ.).
  25. Takakusaki K., Chiba R., Nozu T., Okumura T. Brainstem control of locomotion and muscle tone with special reference to the role of the mesopontine tegmentum and medullary reticulospinal systems. *Journal of Neural Transmission*. 2016; 123(7): 695–729. DOI:10.1007/s00702-015-1475-4.
  26. Takakusaki K. Functional neuroanatomy for posture and gait control. *Journal of Movement Disorders*. 2017; 10(1): 1–17. DOI:10.14802/jmd.16062.
  27. Ignatova T.S., Scoromets A.P., Kolbin V.E., Sarana A.M., Sherbak S.G., Makarenko S.V., Deineko V.V., Danilov Y.P. Translingval'naja nejrostimuljacija golovnoy mozga v lechenii detey s tserebral'nym paralichom [Translingual brain neurostimulation in treatment of the of the pediatric cerebral palsy]. *Bulletin of Restorative Medicine*. 2016; (6): 10–16 (In Russ.).
  28. Ignatova T.C., Ikoeva G.A., Kolbin V.E., Sarana A.M., Shcherbak S.G., Volkov V.G., Kalinina L.P., Skoromets A.P., Danilov U.P. Otsenka effektivnosti translingval'noy nejrostimulyatsii v dvigatel'noy reabilitatsii u detey so spasticheskoy diplegiey [Effectiveness evaluation of translingual neurostimulation in motor rehabilitation in children with spastic diplegia]. *Pediatric Traumatology, Orthopaedics and Reconstructive Surgery*. 2019; 7(2): 17–24. DOI:10.17816/PTORS7217–24 (In Russ.).

#### Контактная информация:

**Никитюк Игорь Евгеньевич**, кандидат медицинских наук, ведущий научный сотрудник лаборатории физиологических и биомеханических исследований, Национальный медицинский исследовательский центр детской травматологии и ортопедии им. Г.И. Турнера Минздрава России, Санкт-Петербург, e-mail: femtotech@mail.ru, ORCID ID 0000-0001-5546-2729

**Кононова Елизавета Леонидовна**, кандидат медицинских наук, старший научный сотрудник лаборатории физиологических и биомеханических исследований, Национальный медицинский исследовательский центр детской травматологии и ортопедии им. Г.И. Турнера Минздрава России, Санкт-Петербург, e-mail: Yelisaveta@yandex.ru, ORCID ID 0000-0001-7624-013X

**Икоева Галина Александровна**, кандидат медицинских наук, заведующая отделением двигательной реабилитации и ведущий научный сотрудник, Национальный медицинский исследовательский центр детской травматологии и ортопедии им. Г.И. Турнера Минздрава России, доцент кафедры детской неврологии и нейрохирургии ФГБОУ ВО «СЗГМУ им. И.И. Мечникова» Минздрава России, Санкт-Петербург, e-mail: ikoeva@inbox.ru, ORCID ID 0000-0001-9186-5568

**Солохина Ирина Юрьевна**, научный сотрудник, невролог, Национальный медицинский исследовательский центр детской травматологии и ортопедии им. Г.И. Турнера Минздрава России, Санкт-Петербург, e-mail: Solokhina.irina@mail.ru, ORCID ID 0000-0003-2628-8148

#### Contact information:

**Igor E. Nikityuk**, PhD (Med.), Leading Researcher of the Laboratory of Physiological and Biomechanical Research, H. Turner National Medical Research Center for Children's Orthopedics and Trauma Surgery, Saint Petersburg, Russia, e-mail: femtotech@mail.ru, ORCID ID 0000-0001-5546-2729

**Elizaveta L. Kononova**, PhD (Med.), Senior Research Associate of the Laboratory of Physiological and Biomechanical Research, H. Turner National Medical Research Center for Children's Orthopedics and Trauma Surgery, Saint Petersburg, Russia. e-mail: Yelisaveta@yandex.ru, ORCID ID 0000-0001-7624-013X

**Galina A. Ikoeva**, PhD (Med.), Head of the Department of Motor Rehabilitation and Leading Researcher, H. Turner National Medical Research Center for Children's Orthopedics and Trauma Surgery, Saint Petersburg, Russia; Associate Professor of the Department of Pediatric Neurology and Neurosurgery, North-Western State Medical University named after I.I. Mechnikov, Saint Petersburg, Russia. e-mail: ikoeva@inbox.ru, ORCID ID 0000-0001-9186-5568

**Irina Yu. Solokhina**, Researcher, Neurologist, H. Turner National Medical Research Center for Children's Orthopedics and Trauma Surgery, Saint Petersburg, Russia, e-mail: Solokhina.irina@mail.ru, ORCID ID 0000-0003-2628-8148

