

# СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ВЕРТИКАЛЬНЫМ БАЛАНСОМ У ДЕТЕЙ С ЦЕРЕБРАЛЬНЫМ ПАРАЛИЧОМ БОЛЕЕ СИНХРОНИЗИРОВАНА ПО СРАВНЕНИЮ СО ЗДОРОВЫМИ ДЕТЬМИ

© *И.Е. Никитюк<sup>1</sup>, Г.А. Икоева<sup>1, 2</sup>, О.И. Кивоенко<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> ФГБУ «НИДООИ им. Г.И. Турнера» Минздрава России, Санкт-Петербург;

<sup>2</sup> ФГБОУ ВО «СЗГМУ им. И.И. Мечникова» Минздрава России, Санкт-Петербург

Статья поступила в редакцию: 20.06.2017

Статья принята к печати: 16.08.2017

**Введение.** Все формы детского церебрального паралича (ДЦП) влекут за собой дефекты двигательной функции. В клинической практике широко используется метод стабилотрии, который показывает высокую информативность при анализе механизмов нарушения и восстановления контроля позы у больных при различных церебральных поражениях.

**Цель исследования.** Изучить параметры ортостатического равновесия у практически здоровых детей и у детей с двигательными нарушениями, развивавшимися на фоне детского церебрального паралича различных степеней тяжести.

**Материал и методы.** Обследованы дети с легкой и тяжелой степенями ДЦП в возрасте от 6 до 12 лет с нарушениями контроля вертикальной позы при сохранной способности к самостоятельному балансу в основной стойке. Каждая группа пациентов состояла из 10 человек, для сравнения обследованы 10 здоровых детей того же возраста. Использован метод стабилотрии, статистическое исследование включало корреляционно-регрессионный анализ.

**Результаты.** Результаты настоящей работы показали, что в группе детей с ДЦП, имеющих двигательные нарушения, по сравнению со здоровыми детьми наблюдается снижение стабильности вертикального баланса, проявляющееся выраженными отклонениями от номинальных значений стабилотрических параметров. Однако при этом выявляется корреляция между параметрами: площадью  $S$ ,  $LFS$  и амплитудой  $A$  центра давления, значительно превышающая таковую у здоровых детей и наиболее сильно выраженная при тяжелой степени ДЦП. Это свидетельствует о более упорядоченной траектории центра давления и, следовательно, более высокой синхронизированности системы управления вертикальным балансом у детей с ДЦП по сравнению со здоровыми детьми.

**Заключение.** Использование корреляционно-регрессионного анализа для изучения вертикального баланса пациентов дает более глубокое понимание механизмов, используемых системой постурального контроля у больных ДЦП для поддержания сложной многоуровневой структуры скелетно-мышечной системы в равновесии в процессе спокойного стояния. Повышенная упорядоченность траектории центра давления статокинезиограмм детей с ДЦП может рассматриваться как динамический показатель дефицита постурального контроля.

**Ключевые слова:** детский церебральный паралич (ДЦП); постуральный контроль; стабилотрия; траектория центра давления.

## THE VERTICAL BALANCE MANAGEMENT SYSTEM IS MORE SYNCHRONIZED IN CHILDREN WITH CEREBRAL PARALYSIS THAN IN HEALTHY CHILDREN

© *I.E. Nikityuk<sup>1</sup>, G.A. Ikoeva<sup>1, 2</sup>, O.I. Kivoenko<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> The Turner Scientific Research Institute for Children's Orthopedics, Saint Petersburg, Russia;

<sup>2</sup> North-Western State Medical University n. a. I.I. Mechnikov, Saint Petersburg, Russia

For citation: *Pediatric Traumatology, Orthopaedics and Reconstructive Surgery*. 2017;5(3):49-57

Received: 20.06.2017

Accepted: 16.08.2017

**Introduction.** All forms of infantile cerebral paralysis involve motor function defects. In clinical practice, the stabilometrics method is widely used due to its ability to perform detailed analyses of the mechanisms of disturbance and restoration of postural control in patients with various cerebral lesions.

**Aim.** The study aimed to analyze the parameters of orthostatic balance in practically healthy children and in children with motor disorders caused by infantile cerebral paralysis of various severities.

**Material and methods.** We examined 6- to 12-year-old children with mild and severe cerebral paralysis and impaired vertical postural control with a preserved ability to self-balance in the principal posture. Each group examined for comparison comprised 10 patients (children with infantile cerebral paralysis, and impaired vertical postural control) and 10 healthy children in the same age range. The stabilometrics method was used, and the statistical evaluation included correlation and regression analyses.

**Results.** The results revealed that in comparison with the healthy children, the patient group exhibited a decrease in the vertical postural stability, which manifested as pronounced deviations from the nominal values of the stabilometric parameters. However, a strong correlation between the parameters of *S*, *LFS*, and the amplitude *A* of the pressure center was revealed, which significantly exceeded that of the healthy children, being most pronounced in cases of severe infantile cerebral paralysis. This indicates a more ordered center of pressure trajectory and, consequently, a higher synchronization of the vertical balance management system in children with infantile cerebral paralysis compared with that in healthy children.

**Conclusion.** The use of correlation and regression analysis to study the vertical balance of patients provides a deeper understanding of the mechanisms used by the postural control system in patients with infantile cerebral paralysis to maintain a complex multilevel structure of the musculoskeletal system in equilibrium in the process of standing still. Increased ordering of the center of pressure trajectory of statokinesiograms of children with infantile cerebral paralysis can be considered as a dynamic indicator of postural control deficiency.

**Keywords:** infantile cerebral paralysis (ICP), postural control, stabilometrics, center of pressure trajectory.

## Введение

Детский церебральный паралич (ДЦП) — одно из самых распространенных и трудных для восстановительного лечения заболеваний нервной системы у детей. В основе патологии лежит органическое поражение нервной системы плода и новорожденного. Основными проявлениями ДЦП, приводящими к стойкой инвалидизации больных, являются нарушения локомоторной функции, которые носят характер патологических стереотипов позы и ходьбы. Все формы ДЦП влекут за собой дефекты двигательной функции, в том числе нарушения системы управления балансом тела. Постуральная стабильность служит фундаментальной предпосылкой для развития моторной функции у детей [1]. В клинической практике широко используется метод стабилометрии, который показывает высокую информативность при анализе механизмов нарушения и восстановления контроля позы у больных при различных церебральных поражениях [2, 3]. При этом оценка способности поддержания больными ДЦП вертикальной позы преимущественно основывается на методе описательной статистики (summary statistics) — на анализе показателей отдельных параметров колебаний центра давления, то есть длины колебательной траектории, средней величины отклонений и т. д. [4]. Однако в последние десятилетия предложен метод изучения постурального контроля, показывающий, что акт удержания вертикальной позы может быть представлен как стохастический процесс, случайность или закономерность которого можно рассматривать с точки зрения теории вероятности [5]. Было

выявлено, что, несмотря на высокую вариабельность и случайность показателей индивидуальных стабилометрических параметров отдельных пациентов, тем не менее выявлялись специфические закономерности, ведущие к формированию усредненных статокинезиограмм — графиков рассеяния параметров. Развитие концепции стохастического процесса для оценки нарушений постурального контроля у больных с нейродегенеративными заболеваниями пошло по пути оценки соотношений параметров колебаний центра давления (ЦД) и проведения корреляционного анализа [6]. Такой принцип анализа динамических характеристик траектории ЦД может оказаться более информативным по сравнению с методологией описательной статистики, особенно при тех видах патологий, при которых изменения в постуральном балансе трудно выявить [7].

**Цель работы** — изучить параметры ортостатического равновесия у практически здоровых детей и у детей с двигательными нарушениями, развивавшимися на фоне детского церебрального паралича различных степеней тяжести.

## Материал и методы

Было проведено обследование 20 больных ДЦП в возрасте от 6 до 12 лет без выраженных расстройств высшей нервной деятельности, с нарушениями контроля вертикальной позы при сохраненной способности к самостоятельному балансу в основной стойке до 2 минут. Родители всех пациентов добровольно подписали информированное согласие на участие в исследовании. Обсле-

дованные дети были распределены на две группы в зависимости от уровня развития двигательных навыков по классификации GMFCS [8].

Первая группа — 10 детей с легкой степенью ДЦП, средний возраст пациентов составил  $9,1 \pm 3,42$  года. Вторая группа — 10 детей с тяжелой формой ДЦП, средний возраст которых составил  $8,9 \pm 4,38$  года.

Для количественной оценки функционального состояния вертикальной устойчивости больных ДЦП всем пациентам было проведено стабилметрическое исследование с помощью компьютерного стабилметрического комплекса МБН – Биомеханика (производитель — ООО НМФ «МБН», Россия). Для сравнения были определены нормативные значения стабилметрических показателей у 10 здоровых детей того же возраста.

Исследования проводили по стандартной функциональной пробе с открытыми (ОГ) и закрытыми глазами (ЗГ) с регистрацией параметров смещения центра давления тела. У детей с нарушениями зрения была использована коррекция при помощи очков. На основании стабилограмм вычисляли следующие параметры: длина траектории, пройденная центром давления ( $L$ , мм), площадь  $S$  ( $\text{мм}^2$ ) статокинезиограммы, отношение длины статокинезиограммы к ее площади  $LFS$  ( $\text{мм}^{-1}$ ), средняя амплитуда колебаний центра давления  $A$  (мм).

Для обработки результатов исследования в плане описательной статистики выполнена проверка распределения количественных признаков на подчинение закону нормального распределения. В связи с тем что в выборках не обнаружено нормальное распределение показателей, параметры по группам были оценены и представлены медианой ( $Me$ ) и интерквар-

тильным размахом  $25-75$  ( $Q_1-Q_2$ ). Для оценки межгрупповых различий использовались односторонний  $t$ -тест и критерий Манна–Уитни. Пороговый уровень статистической значимости принимался при значении критерия  $p < 0,05$ . Для исследования взаимосвязи двух признаков применяли корреляционный анализ с использованием непараметрического коэффициента Спирмена  $r_s$ . Корреляция считалась сильной при  $r_s \geq 0,7$ , средней — при  $0,3 < r_s < 0,7$  [9]. При отрицательной корреляционной зависимости отрицательные значения коэффициента корреляции интерпретировали так же, как и для положительной зависимости. Для поиска функции, описывающей связь между признаками, применяли регрессионный анализ.

Статистическую обработку полученных данных производили с использованием компьютерных программ SPSS 12.0 и Statgraphics Centurion 16.2.

## Результаты

Результаты оценки уровня развития двигательных навыков по классификации GMFCS у больных ДЦП представлены на рис. 1. Из графиков видно, что группы пациентов с легкой и тяжелой степенью ДЦП являлись клинически неоднородными. Средние значения уровней GMFCS составляли соответственно  $1,4 \pm 0,16$  и  $3,3 \pm 0,15$ , различия между ними были статистически значимыми ( $p < 0,05$ ).

Несмотря на значимые различия уровней моторных функций между детьми с легкой и тяжелой степенью ДЦП, в обеих группах определялись выраженные нарушения постурального баланса, на что указывали данные количественных показате-

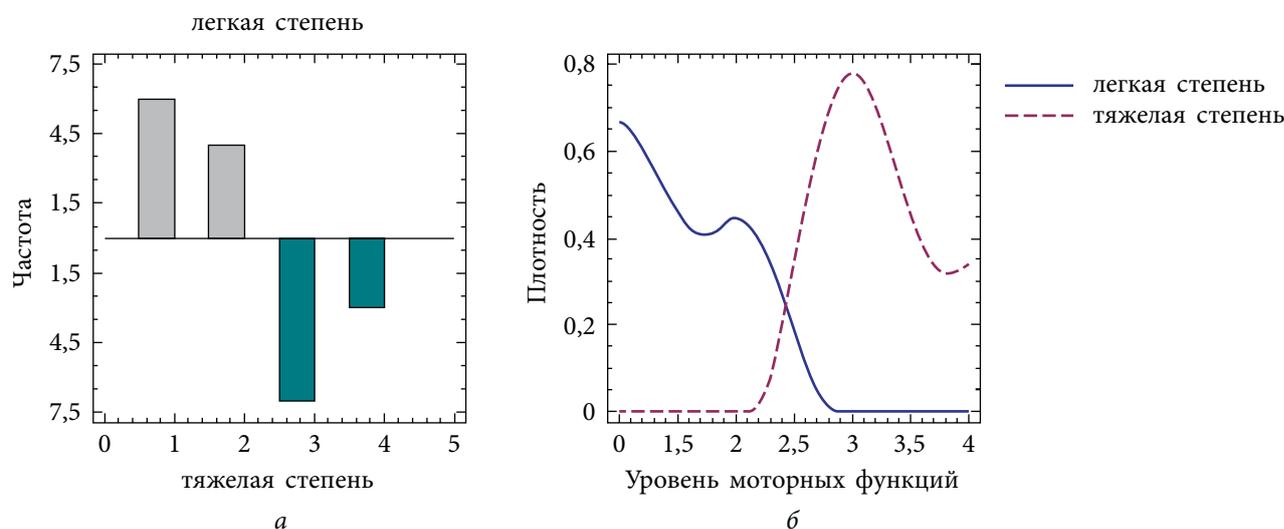


Рис. 1. Уровень моторных функций пациентов с детским церебральным параличом по шкале GMFCS: а — диаграмма распределения значений уровня; б — кривая плотности значений уровня

Таблица 1

Сравнительная характеристика количественных показателей статокинезиограмм здоровых детей и пациентов с различной степенью тяжести детского церебрального паралича (представлены медиана ( $Me$ ) и интерквартильный размах 25–75 ( $Q_1$ – $Q_2$ ))

Параметры	Здоровые дети $Me$ ( $Q_1$ – $Q_2$ ) $n = 10$	Легкая степень ДЦП $Me$ ( $Q_1$ – $Q_2$ ) $n = 10$	Тяжелая степень ДЦП $Me$ ( $Q_1$ – $Q_2$ ) $n = 10$
$L$ , мм	643 (591–814)	1233* (733–1431)	1017* (862–1209)
$S$ , мм <sup>2</sup>	376 (305–695)	1041* (510–1428)	1358* (862–1830)
$LFS$ , мм <sup>-1</sup>	1,66 (1,21–1,97)	0,95* (0,72–1,77)	0,82* (0,53–1,12)
$A$ , мм	2,46 (2,09–3,27)	4,73* (2,98–6,05)	4,85* (4,01–7,39)

Примечание: \* достоверные отличия от показателей здоровых детей,  $p < 0,05$ .

лей стабилотрии (табл. 1). В первую очередь это проявлялось статистически значимым увеличением средних значений длины  $L$ , площади  $S$  и амплитуды колебаний центра давления  $A$  статокинезиограмм пациентов по сравнению с аналогичными показателями у здоровых детей ( $p < 0,05$ ). При этом величины указанных стабилотрических параметров у больных ДЦП обеих групп характеризовались большим разбросом. Значения показателя  $LFS$  также достоверно отличались от нормы у всех больных ДЦП, но только в сторону понижения ( $p < 0,05$ ).

Различия в величинах стабилотрических параметров между больными легкой и тяжелой степеней не были статистически значимы, при этом сравнительная межгрупповая оценка медиан, нижних и верхних квартилей не выявила каких-либо закономерностей в состоянии вертикального баланса у больных ДЦП. Это может свидетельствовать об ограниченных возможностях описательной статистики при сравнительной оценке функции поддержания вертикаль-

ного баланса у детей с ДЦП различной степени тяжести.

Корреляционно-регрессионный анализ позволил изучить зависимость площади  $S$  и параметра  $LFS$  статокинезиограмм здоровых и больных детей от амплитуды колебаний  $A$  центра давления. Для этого был проведен поиск уравнения криволинейной регрессии, выбор которого определялся анализом диаграммы рассеяния и физиологическим смыслом коэффициентов регрессии. Наиболее оптимально данной задаче удовлетворяла степенная аллометрическая функция:

$$y = bx^a,$$

где  $a$  и  $b$  — коэффициенты регрессии, переменная  $x$  соответствует амплитуде колебаний  $A$  центра давления, переменная  $y$  — площади  $S$  или параметру  $LFS$ . Для графического выражения взаимосвязи стабилотрических параметров были построены линии регрессии (рис. 2–7).

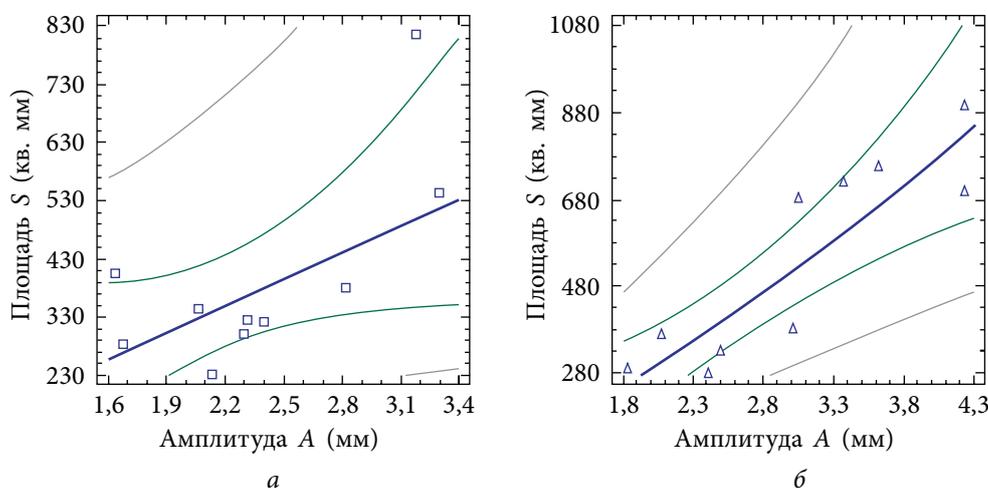


Рис. 2. Линия регрессии (жирная) и ее доверительный интервал (тонкие линии) для зависимости площади  $S$  статокинезиограмм от амплитуды колебаний  $A$  у здоровых детей: а — при открытых глазах; б — при закрытых глазах

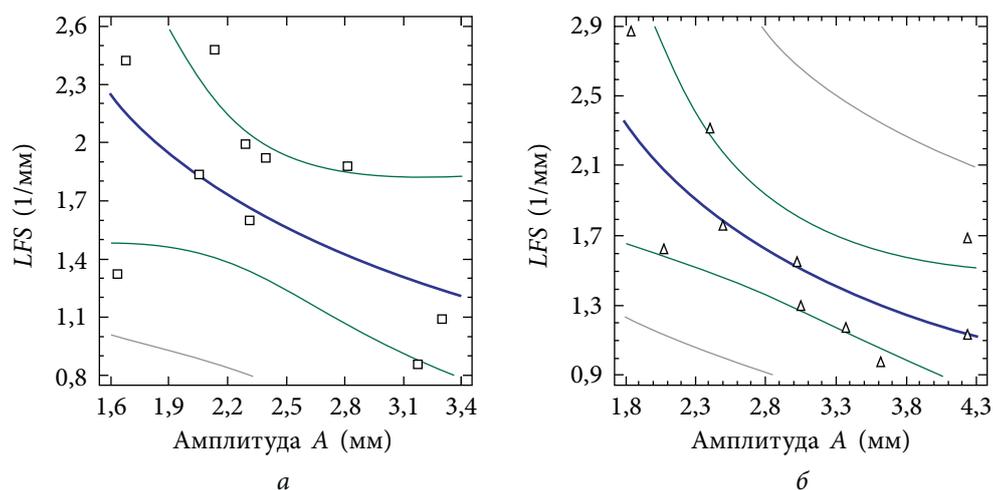


Рис. 3. Линия регрессии (жирная) и ее доверительный интервал (тонкие линии) для зависимости параметра  $LFS$  ста-токинезиограмм от амплитуды колебаний  $A$  у здоровых детей:  $a$  — при открытых глазах;  $b$  — при закрытых глазах

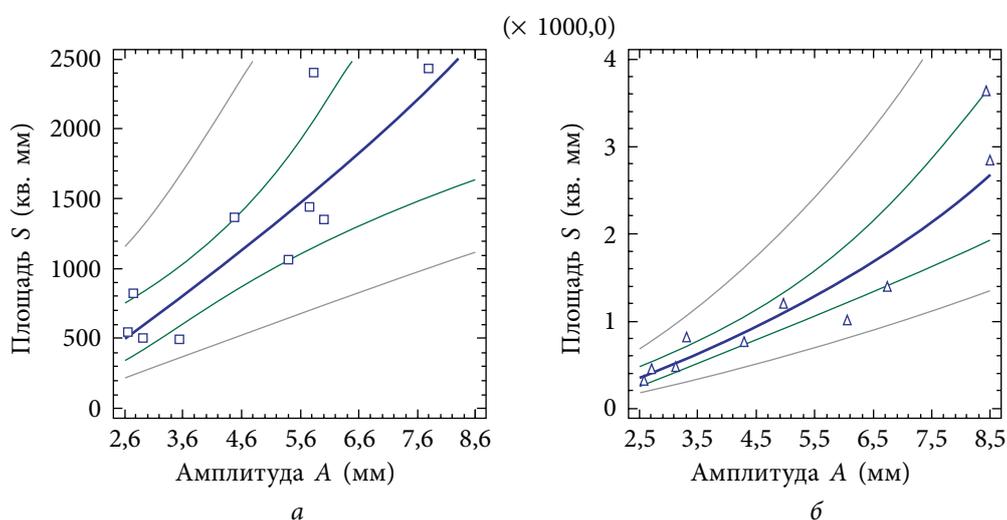


Рис. 4. Линия регрессии (жирная) и ее доверительный интервал (тонкие линии) для зависимости площади  $S$  ста-токинезиограмм от амплитуды колебаний  $A$  у детей с ДЦП легкой степени:  $a$  — при открытых глазах;  $b$  — при закрытых глазах

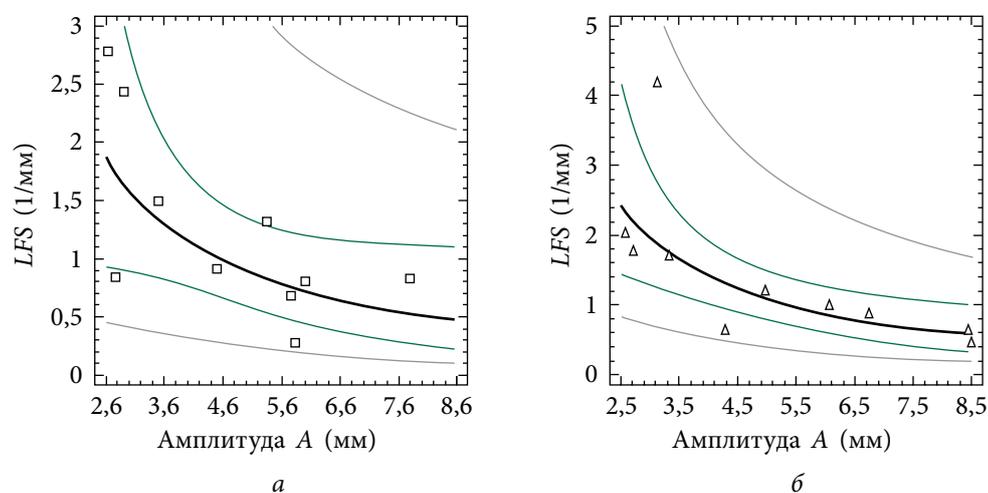
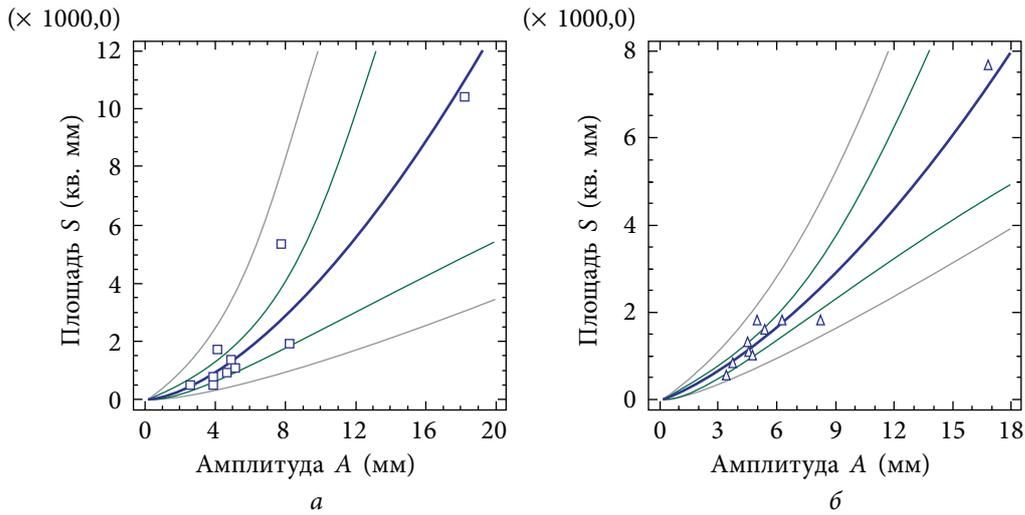
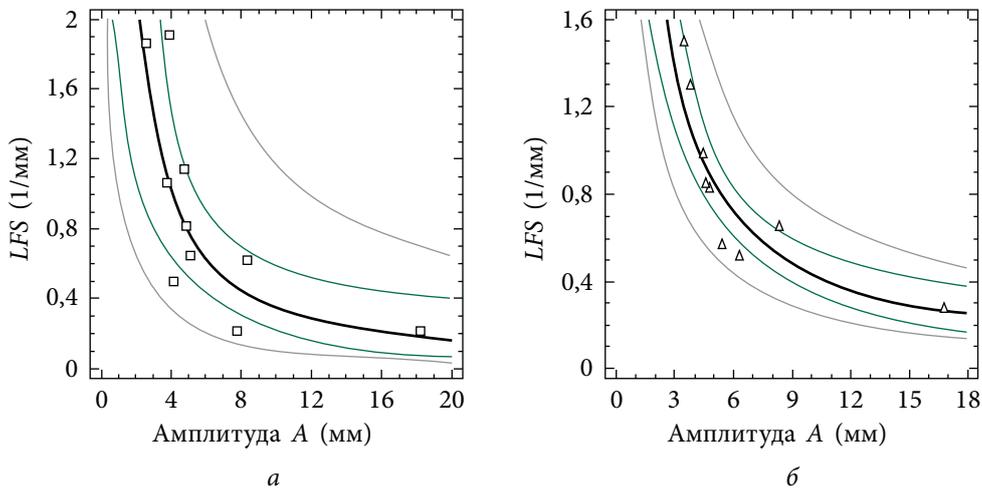


Рис. 5. Линия регрессии (жирная) и ее доверительный интервал (тонкие линии) для зависимости параметра  $LFS$  ста-токинезиограмм от амплитуды колебаний  $A$  у детей с ДЦП легкой степени:  $a$  — при открытых глазах;  $b$  — при закрытых глазах



**Рис. 6.** Линия регрессии (жирная) и ее доверительный интервал (тонкие линии) для зависимости площади  $S$  стадокинезиограмм от амплитуды колебаний  $A$  у детей с ДЦП тяжелой степени:  $a$  — при открытых глазах;  $b$  — при закрытых глазах



**Рис. 7.** Линия регрессии (жирная) и ее доверительный интервал (тонкие линии) для зависимости параметра  $LFS$  стадокинезиограмм от амплитуды колебаний  $A$  у детей с ДЦП тяжелой степени:  $a$  — при открытых глазах;  $b$  — при закрытых глазах

Таблица 2

Корреляционно-регрессионный анализ зависимости площади  $S$  и параметра  $LFS$  стадокинезиограмм здоровых детей больных детским церебральным параличом от амплитуды колебаний  $A$  центра давления

Обследованные дети		Уравнение регрессии		$r_s$		$\Delta S, \%$	$\Delta LFS, \%$
		$S \sim A$	$LFS \sim A$	$S \sim A$	$LFS \sim A$		
Здоровые	ОГ	$S = 5,1A^{0,96}$	$LFS = 1,2A^{-0,83}$	0,64	-0,58	9,6	7,7
	ЗГ	$S = 4,73A^{1,38}$	$LFS = 1,36A^{-0,85}$	0,88	-0,74	14,1	7,8
ДЦП легкой степени	ОГ	$S = 4,92A^{1,37}$	$LFS = 1,71A^{-1,13}$	0,87	-0,65	14,9	9,9
	ЗГ	$S = 4,34A^{1,66}$	$LFS = 1,98A^{-0,81}$	0,95	-0,81	17,1	10,9
ДЦП тяжелой степени	ОГ	$S = 4,44A^{1,68}$	$LFS = 1,65A^{-1,17}$	0,91	-0,82	17,4	10,6
	ЗГ	$S = 4,82A^{1,44}$	$LFS = 1,38A^{-0,96}$	0,95	-0,92	14,7	8,9

Примечание: ОГ — открытые глаза; ЗГ — закрытые глаза;  $r_s$  — коэффициент корреляции;  $\Delta S$  — изменение площади;  $\Delta LFS$  — изменение параметра  $LFS$  (в зависимости от 10 % изменения величины амплитуды колебаний  $A$  центра давления).

Результаты корреляционно-регрессионного анализа представлены в табл. 2.

Корреляционный анализ показал, что средние значения модулей коэффициентов корреляции в группе здоровых детей, больных ДЦП легкой и тяжелой степеней, составляют 0,71; 0,82 и 0,90 соответственно. В группе здоровых детей два коэффициента корреляции из четырех по модулю не превышают значений 0,7 и один — незначительно его превышает, из чего можно предположить, что в норме изменения параметров  $S$ ,  $LFS$  и  $A$  большей частью носят случайный характер (см. рис. 2 и 3). Более высокие значения  $r_s$  установлены в группе пациентов с легкой степенью ДЦП (см. рис. 3 и 4). Самая сильная корреляционная связь между параметрами  $S$ ,  $LFS$  и  $A$ , наглядно представленная графически (см. рис. 6 и 7), зафиксирована в группе пациентов с тяжелой степенью ДЦП.

В результате регрессионного анализа были выявлены особенности состояния постурального баланса у здоровых детей и больных ДЦП в зависимости от вовлеченности в процессе тестирования зрительного анализатора. В группе здоровых детей при переходе от открытых глаз к закрытым 10 % изменение амплитуды колебаний  $\Delta A$  приводило к существенному увеличению изменения параметра  $\Delta S$  и в меньшей степени —  $\Delta LFS$ . Аналогичная картина наблюдалась у детей с легкой степенью ДЦП. В группе детей с ДЦП тяжелой степени определялось обратное соотношение — при переходе от открытых глаз к закрытым изменение амплитуды колебаний  $\Delta A$  приводило не к увеличению, а к существенному уменьшению изменения параметра  $\Delta S$  и  $\Delta LFS$ . При этом во всех группах обследованных детей, как здоровых, так и больных, при выключении канала зрительной афферентации происходило усиление корреляционной связи между стабилметрическими параметрами  $S$ ,  $LFS$  и  $A$ .

## Обсуждение результатов

Хорошо известно, что ведущим признаком нарушений локомоторной функции у больных ДЦП является неустойчивый постуральный баланс, выражающийся в более высоких по сравнению с нормой показателях колебаний центра давления [10]. Для обеспечения самостоятельной вертикальной стойки у такого контингента пациентов необходима сохранность системы управления вертикальным балансом, контролирующей точную координацию и синхронизацию действий мышц практически всего опорно-двигательного аппарата одновременно. При этом ЦНС больных ДЦП

продолжает выполнять сложную функцию по анализу всей поступающей информации от различных сенсорных систем: визуальной, проприоцептивной, вестибулярной, экстерорецептивной для обеспечения согласованного действия мышц [11]. Считается, что несогласованность интеграции афферентного притока у таких пациентов [12], осложненная нарушениями взаимодействия двигательной коры со стриопаллидарной системой и со зрительным бугром [13], в совокупности негативно сказывается на системе постурального контроля [14, 15].

В настоящем исследовании с помощью описательной статистики было показано значительное снижение постуральной стабильности у больных ДЦП, проявляющееся более выраженными по сравнению с нормой колебаниями центра давления в процессе спокойного стояния, что согласуется с данными других авторов [16]. Однако использование описательной статистики для интерпретации межгрупповых различий результатов стабилметрии у обследованных детей с легкой и тяжелой степенями ДЦП с точки зрения системы управления балансом тела оказалось неэффективным. Дело в том, что до сих пор не решена проблема точной идентификации постуральной нестабильности у пациентов с нейродегенеративными заболеваниями, у которых повышенное отклонение стабилметрических параметров от нормальных величин вовсе не является исчерпывающей характеристикой дефицита постурального контроля [17]. Поэтому в данной работе при анализе стабิโลграмм был использован принцип статистической механики, постулирующей, что движение центра давления ребенка в процессе спокойного стояния может быть смоделировано как система парных скоррелированных случайных параметров [18]. То есть механизм контроля вертикального баланса носит стохастический, вероятностный характер [19]. Такой подход к анализу траектории центра давления особенно нагляден и теоретически важен вследствие его более высокой чувствительности и информативности при оценке изменений в постуральной стабильности [20].

Результаты настоящей работы показали, что у имеющих двигательные нарушения детей с ДЦП, по сравнению со здоровыми детьми, наблюдается снижение стабильности вертикального баланса, проявляющееся выраженными отклонениями от номинальных значений стабилметрических параметров. Однако при этом обнаруживается сильная корреляционная связь между параметрами: площадью  $S$ ,  $LFS$  и амплитудой  $A$  центра давления, значительно превышающая таковую у здо-

ровых детей и наиболее сильно выраженная при тяжелой степени ДЦП. Это может указывать на более упорядоченную траекторию центра давления и, следовательно, более высокую синхронизированность системы управления вертикальным балансом у детей с ДЦП по сравнению со здоровыми детьми.

Физиологические механизмы полученных результатов пока неясны и, несомненно, требуют глубокого исследования. На данном этапе можно сформулировать лишь гипотезы. Существует точка зрения, что повышенная упорядоченность траектории центра давления у детей с ДЦП может рассматриваться как динамический показатель дефицита постурального контроля [21]. С этой концепцией перекликаются данные, согласно которым более высокая по сравнению с нормой упорядоченность траектории центра давления характерна для пациентов при других нозологических формах поражения ЦНС: при черепно-мозговых травмах [22] и при паркинсонизме [23]. Указанные данные согласуются с гипотезой так называемой «патологической упорядоченности против нормальной запутанности» (pathological regularity versus healthy complexity) [24], в соответствии с которой менее «запутанные» (или более «упорядоченные») параметры биологических процессов отражают менее эффективный физиологический контроль.

## Заключение

Несмотря на то что у больных ДЦП отмечаются грубые нарушения вертикального баланса вследствие отклонений в механизмах организации движения на разных уровнях, система управления вертикальным балансом у них более синхронизирована по сравнению со здоровыми детьми. При этом скоррелированность стабиллометрических признаков при тяжелой степени ДЦП значительно выше, чем при легкой.

Корреляционно-регрессионный анализ, примененный для изучения вертикального баланса пациентов, может дать более глубокое понимание механизмов, используемых системой постурального контроля у больных ДЦП для поддержания сложной многоуровневой структуры скелетно-мышечной системы в равновесии в процессе спокойного стояния.

Это перспективно в плане количественной оценки состояния моторных дефектов и ресурсов больных ДЦП с целью определения стратегии отклика постуральных и локомоторных нейросетей пациентов на внешние стимулирующие лечебные воздействия.

## Информация о финансировании и конфликте интересов

Работа проведена на базе и при поддержке ФГБУ «НИДОИ им. Г.И. Турнера» Минздрава России. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

## Список литературы

1. De Kegel A, Dhooge I, Peersman W, et al. Construct validity of the assessment of balance in children who are developing typically and in children with hearing impairments. *Phys Ther*. 2010;90(12):1783-94.
2. Kyvelidou A, Harbourne RT, Shostrom VK, Stergiou N. Reliability of center of pressure measures for assessing the development of setting postural in infants with or at risk of cerebral palsy. *Arch Phys Med Rehabil*. 2010;91(10):1593-1601. doi: 10.1016/j.apmr.2010.06.027.
3. Gasq D, Labrunée M, Amarantini D, et al. Between-day reliability of centre of pressure measures for balance assessment in hemiplegic stroke patients. *J Neuroeng Rehabil*. 2014;11:39. doi: 10.1186/1743-0003-11-39.
4. Smania N, Bonetti P, Gandolfi M, et al. Improved gait after repetitive locomotor training in children with cerebral palsy. *Am J Phys Med Rehabil*. 2011;90(2):137-149. doi: 10.1097/phm.0b013e318201741e.
5. Riley MA, Balasubramaniam R, Turvey MT. Recurrence quantification analysis of postural fluctuations. *Gait Posture*. 1999;9:65-78.
6. Blaszczyk JW, Klonowski W. Postural stability and fractal dynamics. *Acta Neurobiol Exp*. 2001;61:105-112.
7. Roerdink M, De Haart M, Daffertshofer A, et al. Dynamical structure of center-of-pressure trajectories in patients recovering from stroke. *Exp Brain Res*. 2006;174:256-269. doi: 10.1007/s00221-006-0441-7.
8. Russell DJ, Rosenbaum PL, Cadman DT, et al. The gross motor function measure: a means to evaluate the effects of physical therapy. *Dev Med Child Neurol*. 1989;31(3):341-352. doi: 10.1111/j.1469-8749.1989.tb04003.x.
9. Зайцев В.М., Лифляндский В.Г., Маринкин В.И. Прикладная медицинская статистика. – СПб.: Фолиант, 2003. – 428 с. [Zaytsev VM, Lifyandskiy VG, Marinkin VI. Prikladnaya meditsinskaya statistika. Saint Petersburg: Foliant; 2003. 428 p. (In Russ.)]
10. Rha DW, Kim DJ, Park ES. Effect of hinged ankle-foot orthoses on standing balance control in children with bilateral spastic cerebral palsy. *Yonsei Med J*. 2010;51(5):746-752. doi: 10.3349/ymj.2010.51.5.746.
11. Grecco LAC, Tomita SM, Christovao TCL, et al. Effect of treadmill gait training on static and functional balance in children with cerebral palsy: a randomized controlled trial. *Braz J Phys Ther*. 2013;17(1):17-23.
12. Ferdjallah M, Harris GF, Smith P, Wertsch JJ. Analysis of postural control synergies during quiet standing

- in healthy children and children with cerebral palsy. *Clinical Biomechanics*. 2002;17(3):203-210.
13. Левченкова В.Д., Семенова К.А. Современные представления о морфологической основе детского церебрального паралича // Журнал неврологии и психиатрии. – 2012. – Т. 112. – № 7–2. – С. 4–8. [Levchenkova VD, Semenova KA. Contemporary views of the morphological basis of infant cerebral palsy. *Zhurnal nevrologii i psikhiatrii*. 2012;112(7-2):4-8. (In Russ.)]
  14. Куренков А.Л., Батышева Т.Т., Виноградов А.В., Зюзьева Е.К. Спастичность при детском церебральном параличе: диагностика и стратегия лечения // Журнал неврологии и психиатрии. – 2012. – Т. 112. – № 7–2. – С. 24–28. [Kurenkov AL, Batysheva TT, Vinogradov AV, Zyuzyaeva EK. Spasticity in children cerebral palsy: diagnosis and treatment strategies. *Zhurnal nevrologii i psikhiatrii*. 2012;112(7-2):24-28. (In Russ.)]
  15. Немкова С.А. Оценка эффективности комплексной реабилитации у детей с церебральным параличом и последствиями черепно-мозговой травмы // Российский нейрохирургический журнал им. А.Л. Поленова. – 2013. – № 5. – С. 56–59. [Nemkova SA. Assessment of the effectiveness of complex rehabilitation in patient with cerebral palsy and outcomes of traumatic brain injury. *Rossiyskiy neyrokhirurgicheskiy zhurnal im. A.L. Polenova*. 2013;(5):56-9. (In Russ.)]
  16. Drużbicki M, Rusek W, Szczepanik M, et al. Assessment of the impact orthotic gait training on balance in children with cerebral palsy. *Acta of Bioengineering and Biomechanics*. 2010;12(2):53-8.
  17. Blaszczyk JW. Sway ratio – a new measure for quantifying postural stability. *Acta Neurobiol Exp*. 2008;68:51-7.
  18. Collins JJ, De Luca CJ. Open-loop and closed-loop control of posture: a random-walk analysis of center-of-pressure trajectories. *Exp Brain Res*. 1993;95:308-318.
  19. Newell KM, Slobounov SM, Slobounova ES, Molenaar PC. Stochastic processes in postural center-of-pressure profiles. *Exp Brain Res*. 1997;113:158-164.
  20. Raymakers JA, Samson MM, Verhaar HJJ. The assessment of body sway and the choice of the stability parameter(s). *Gait Posture*. 2005;21:48-58.
  21. Donker SF, Ledebt A, Roerdink M, et al. Children with cerebral palsy exhibit greater and more regular postural sway than typically developing children. *Exp Brain Res*. 2008;184:363-370. doi: 10.1007/s00221-007-1105-y.
  22. Cavanaugh JT, Guskiewicz KM, Stergiou N. A nonlinear dynamic approach for evaluating postural control: new directions for the management of sport-related cerebral concussion. *Sports Med*. 2005;35:935-950.
  23. Schmit JM, Riley MA, Dalvi A, et al. Deterministic center of pressure patterns characterize postural instability in Parkinson's disease. *Exp Brain Res*. 2006;168:357-367.
  24. Goldberger AL. Fractal variability versus pathological periodicity: complexity loss and stereotypy in disease. *Perspect Biol Med*. 1997;40:543-561.

### Сведения об авторах

**Игорь Евгеньевич Никитюк** — канд. мед. наук, ведущий научный сотрудник лаборатории физиологических и биомеханических исследований ФГБУ «НИДОИ им. Г.И. Турнера» Минздрава России. E-mail: femtotech@mail.ru.

**Галина Александровна Икоева** — канд. мед. наук, доцент кафедры детской неврологии и нейрохирургии ФГБОУ ВО «СЗГМУ им. И.И. Мечникова» Минздрава России. Заведующая отделением двигательной реабилитации ФГБУ «НИДОИ им. Г.И. Турнера» Минздрава России. E-mail: ikoeva@inbox.ru.

**Ольга Ивановна Кивоенко** — врач-невролог, заведующая реабилитационным отделением ФГБУ «НИДОИ им. Г.И. Турнера» Минздрава России. E-mail: rt-k@yandex.ru.

**Igor E. Nikityuk** — MD, PhD, leading research associate of the laboratory of physiological and biomechanical research. The Turner Scientific and Research Institute for Children's Orthopedics. E-mail: femtotech@mail.ru.

**Galina A. Ikoeva** — MD, PhD, assistant professor of the chair of pediatric neurology and neurosurgery. North-Western State Medical University n.a. I.I. Mechnikov. Chief of the department of motor rehabilitation. The Turner Scientific and Research Institute for Children's Orthopedics. E-mail: ikoeva@inbox.ru.

**Olga I. Kivoenko** — MD, neurologist, head of the rehabilitation department. The Turner Scientific and Research Institute for Children's Orthopedics. E-mail: rt-k@yandex.ru.