

Нарушение функции стоп у детей с тяжелыми формами спондилолистеза L5 позвонка

И.Е. Никитюк, С.В. Виссарионов

ФГБУ «Научно-исследовательский детский ортопедический институт им. Г.И. Турнера» Минздрава России, Санкт-Петербург, Россия

Реферат

Актуальность. У детей со спондилолистезом до настоящего времени остаются необъяснимыми моменты взаимосвязи степени смещения L5 позвонка с выраженностью клинической картины и неврологических нарушений. При этом не изучены аспекты взаимногоотягощающего влияния указанной патологии позвоночника на состояние стоп. Поэтому актуальна проблема выявления нарушений функции стоп у детей со спондилолистезом L5 позвонка. **Цель исследования** — оценить отклонения плантографических показателей состояния поперечного и продольного сводов стоп у детей, страдающих тяжелыми формами спондилолистеза L5 позвонка. **Материал и методы.** В период с 2016 по 2018 г. проведено обследование 12 детей в возрасте 14,1 [12,7; 15,5] лет со спондилолистезом тела L5 позвонка III–IV степени, сопровождающимся стенозом позвоночного канала на этом уровне и компрессией корешков спинного мозга. В контрольную группу были включены 12 здоровых детей того же возраста, которым проводили только плантографическое обследование. Методами лучевой диагностики являлись мультиспиральная компьютерная томография и магнитно-резонансная томография. Для оценки функции стоп применяли двуопорную и одноопорную плантографию. **Результаты.** У больных со спондилолистезом средняя величина переднего t и срединного s индексов опоры оказалась значимо ниже аналогичных показателей у здоровых детей. Вместе с тем в тестах с повышением нагрузки на стопу у пациентов не происходило значимого увеличения средних показателей переднего t и медиального m индексов, что указывает на динамическую ригидность поперечного и внутреннего продольного сводов. Величина латерального индекса опоры l показала его значимое патологическое увеличение по сравнению с нормой при одноопорной нагрузке, что свидетельствует о статической ригидности наружного продольного свода. Корреляционный анализ показал, что по сравнению с нормой опороспособность стоп у больных детей реализуется за счет патологического усиления функциональной взаимосвязи между сводами стопы при двуопорной нагрузке и нефизиологического снижения взаимодействия между ними при одноопорной нагрузке. **Заключение.** У детей с тяжелыми формами спондилолистеза L5 позвонка данные плантографических исследований свидетельствуют о ригидности сводов стоп и нарушении их опорной стратегии. Необходимо учитывать отягощающее влияние ригидных стоп на состояние позвоночника и включать в план комплексной диагностики детей со спондилолистезом изучение опорной функции стоп.

Ключевые слова: спондилолистез, плантография, плантографические индексы.

Никитюк И.Е., Виссарионов С.В. Нарушение функции стоп у детей с тяжелыми формами спондилолистеза L5 позвонка. *Травматология и ортопедия России*. 2019;25(2):71–80. DOI: 10.21823/2311-2905-2019-25-2-71-80.

Cite as: Nikityuk I.E., Vissarionov S.V. [Foot Function Disorders in Children with Severe Spondylolisthesis of L5 Vertebra]. *Travmatologiya i ortopediya Rossii* [Traumatology and Orthopedics of Russia]. 2019;25(2):71–80. (In Russian). DOI: 10.21823/2311-2905-2019-25-2-71-80.

✉ Никитюк Игорь Евгеньевич / Igor E. Nikityuk; e-mail: femtotech@mail.ru

Рукопись поступила/Received: 13.12.2018. Принята в печать/Accepted for publication: 10.04.2019.

Foot Function Disorders in Children with Severe Spondylolisthesis of L5 Vertebra

I.E. Nikityuk, S.V. Vissarionov

Turner Scientific Research Institute for Children's Orthopedics,
St. Petersburg, Russian Federation

Abstract

Background. In children with spondylolisthesis, there are still unexplained aspects in the relationship of the degree of displacement of the L5 vertebra with the severity of the clinical picture and neurological disorders. At the same time, aspects of the mutual aggravating influence of the indicated spinal disorder on the condition of the feet have not been studied. Therefore, the problem of identifying disorder of foot function in children with spinal spondylolisthesis of the L5 vertebra is relevant. **Aim of the study** — to evaluate the deviations in parameters of the transverse and longitudinal arches of feet in children suffering from severe spondylolisthesis of the L5 vertebra. **Materials and Methods.** In the period from 2016 to 2018, 12 children aged 14.1 y.o. [12,7; 15,5] were examined with spondylolisthesis of the L5 vertebral body of grade III-IV, accompanied by stenosis of the spinal canal at the same level and by compression of the roots of the spinal cord. Imaging diagnostics included multispinal computed tomography (MSCT) and magnetic resonance imaging (MRI). To estimate the function of the feet, double-bearing and single-bearing plantography was used. The data for the control group included only plantographic examinations of 12 healthy children of the same age. **Results.** In patients with spondylolisthesis, the mean value of the anterior *t* and intermediate *s* plantographic bearing indices were significantly lower than those of healthy children. At the same time, in tests with an increased load on the foot in patients, there was no significant increase in the mean anterior *t* and medial *m* indices, which indicates the dynamic rigidity of the transverse and medial longitudinal arches. The value of the lateral plantographic index *l* showed its significant pathological increase compared with the normal value at double-bearing load, which indicates the static rigidity of the lateral longitudinal arch. Correlation analysis demonstrated that, against the normal state, the bearing ability of the feet in sick children is realized through a pathological strengthening of the functional relationship between the arches of the foot at double-bearing load and a non-physiological reduction of the interaction between arches at single-bearing load. **Conclusion.** In children with severe forms of vertebra spondylolisthesis, the parameters of plantographic characteristics indicate the rigidity of the arches of the feet and the distortion of their bearing pattern. It is necessary to take into account the aggravating effect of rigid feet on the state of the spine and include the examination of the bearing function of the feet in the algorithm for the comprehensive diagnosis of children with spondylolisthesis.

Keywords: spondylolisthesis, children, plantography, plantographic indices.

Введение

Несмотря на длительную историю изучения спондилолистеза, различные аспекты этой патологии продолжают оставаться малоизвестными. У детей сложность изучения спондилолистеза обусловлена отсутствием четкой закономерности между степенью смещения L5 позвонка и характером изменений со стороны позвоночного столба в целом [1]. Трудности в оценке процессов, происходящих в позвоночнике в результате спондилолистеза у детей и подростков, пытаются объяснить быстрыми темпами роста пациентов, а также индивидуальными особенностями биомеханической перестройки при прогрессирующем смещении позвонка в условиях развивающегося организма [2].

Однако до настоящего времени остаются необъяснимыми моменты взаимосвязи степени смеще-

ния L5 позвонка с выраженностью клинической картины и неврологических нарушений. Так, например, у одних детей яркая клиническая картина с наличием неврологического дефицита наблюдается уже при начальных степенях смещения L5 позвонка, в то время как у других больных даже при значительном смещении позвонка симптоматика стертая. Спондилолистез поясничного позвонка может сопровождаться симптомами радикулопатии вследствие натяжения и сдавления нервных корешков, которые могут проявляться онемением, покалыванием или слабостью в нижних конечностях [3], вплоть до выраженного болевого синдрома в них [4]. В случае значительного стеноза позвоночного канала в пояснично-крестцовом сегменте позвоночника вертебро-радикулярный конфликт [5] может не только сопровождаться нарушениями походки [6], но и приводить к деформациям стоп [7].

Несмотря на то, что в клинической практике достаточно широко используются биомеханические методы диагностики нарушения функций опорно-двигательного аппарата [8], вопросыотягощающего влияния заболеваний позвоночника на состояние стоп у детей изучены недостаточно. В литературе встречаются немногочисленные данные о связи болезней позвоночника с деформацией стоп, которые противоречивы [9, 10]. С учетом вышеизложенного, сохраняет свою актуальность и значимость проблема выявления нарушений функции стоп у детей с патологией позвоночного столба.

Цель исследования — оценить отклонения плантографических показателей состояния поперечного и продольного сводов стоп у детей, страдающих тяжелыми формами спондилолистеза L5 позвонка.

Материал и методы

Дизайн исследования и сроки проведения. Выполнено одномоментное ретроспективное исследование в период с 2016 по 2018 г.

Пациенты. Проведен анализ историй болезни и результатов лучевого обследования основной группы детей — 12 пациентов в возрасте 14,1 [12,7; 15,5] лет со спондилолистезом L5 позвонка III–IV степени. Минимальный возраст пациентов составил 8 лет, максимальный — 17. Степень тяжести спондилолистеза L5 позвонка определяли по классификации Н.В. Meyerding [11]. Спондилолистез III степени отмечен у 5 пациентов, IV степени — у 7 детей (рис. 1). У всех пациентов имел место спондилолизный спондилолистез. В контрольную группу были включены 12 здоровых детей того же возраста, которым проводили только плантографическое обследование.

Критерии соответствия. В исследование включены пациенты со спондилолистезом тела L5 по-

звонка III–IV степени, сопровождающимся стенозом позвоночного канала на этом уровне и компрессией корешков спинного мозга. У всех больных выявлялась неврологическая симптоматика в виде наличия радикулярного синдрома разной степени выраженности.

Критерии исключения: спондилолистез I и II степени, наличие у пациентов неврологических нарушений типа А, В и С по шкале Frankel с парезами и контрактурами нижних конечностей. Исключение из выборки составили пациенты с выраженными супинационными контрактурами стоп различного генеза, вследствие невозможности установить реперные точки и провести вычисления плантографических индексов ввиду отсутствия опорности головки первой плюсневой кости с одной или обеих сторон. Также по причине невозможности определения индексов стоп из группы пациентов были исключены дети с двусторонним продольным плоскостопием II степени и выше, которое диагностировали по классической методике С.Ф. Годунова [12].

Методы. Методами лучевой диагностики спондилолистеза являлись рентгенография, мульти-спиральная компьютерная томография (МСКТ) и магнитно-резонансная томография (МРТ), определяющие степень смещения L5 позвонка и оценивающие положение корешков спинного мозга. Рентгенологическое исследование проводили в двух стандартных проекциях с применением функциональных проб на аппарате PHILIPS Digital Diagnost (Голландия). МСКТ проводили на аппарате PHILIPS Brilliance 64 (Голландия) по низкодозному протоколу для каждой возрастной группы, с объемной (3D) и MPR-реконструкцией полученных изображений во фронтальной, сагиттальной и аксиальной плоскостях. МРТ осуществляли на аппарате PHILIPS Panorama NFO 1.0T. (Голландия) по стандартному протоколу.

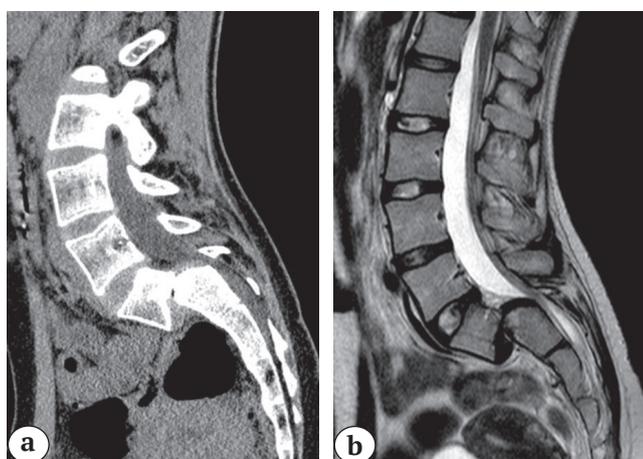


Рис. 1. Пациентка, 17 лет. Спондилолистез L5 позвонка IV степени. Деформация и стеноз позвоночного канала на уровне пояснично-крестцового отдела позвоночника: а — МСКТ; б — МРТ

Fig. 1. Female patient, 17 y.o. L5 spondylolisthesis of grade IV. Deformity and spinal canal stenosis at lumbosacral spine: a — MSCT; b — MRI

Исследование опорной функции стоп проводили на программно-аппаратном комплексе диагностики «Подоскан» (ООО НМФ «МБН», Россия), усовершенствовав методику для определения плантографических характеристик и оценки параметров сводов стоп [13]. Оценку функционирования стоп в динамике проводили при различной весовой нагрузке на стопу: нагрузка половиной веса тела на каждую стопу (плантография двуопорная) и весом всего тела на каждую стопу (плантография одноопорная). Рассчитывали плантографические индексы сводов, определяемые соотношением локальной нагрузки на отдел свода к общей нагрузке на свод, дающие информацию о состоянии стопы [14]. Для этого на плантограммах расставляли идентификационные точки и соединяли их линиями (рис. 2) для расчета индексов опоры стоп: переднего — $t = KE/BC$, медиального — $m = GS/GO$, срединного — $s = PW/PO$ и латерального — $l = MN/NO$. Указанные индексы отражают состояние сводов стопы: t — поперечного, m — внутреннего продольного, s — срединного продольного, l — наружного продольного.

Статистические методы обработки

Статистическую обработку полученных данных осуществляли, используя компьютерные программы SPSS 11.5 (IBM Corp., USA) и Statgraphics

Centurion 16.2 (Statgraphics Technologies Inc., USA). Проверяли гипотезы о виде распределений вариационных рядов (критерии Шапиро — Уилка и Колмогорова — Смирнова). Так как в сравниваемых группах хотя бы в одной количественные признаки не соответствовали закону нормального распределения, для сравнения значений несвязанных выборок использовался U-критерий Манна — Уитни, а для внутригрупповых сравнений применялся критерий Вилкоксона с расчетом Z-критерия. Количественные данные представляли в виде медианы (Me), нижнего и верхнего квартилей (Q1–Q3). 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 , который позволил изучить взаимосвязь поперечного и продольных сводов (соответственно, связь индексов опоры t , m и s). Корреляция считалась сильной при $r_s \geq 0,7$.

Результаты

В ходе клинического осмотра у здоровых детей и пациентов не было выявлено симптомов соединительно-тканной и мышечной дисплазий, внешних стигм дисэмбриогенеза. Отсутствовали контрактуры в коленных и тазобедренных суставах. Вес детей был в пределах возрастных норм.

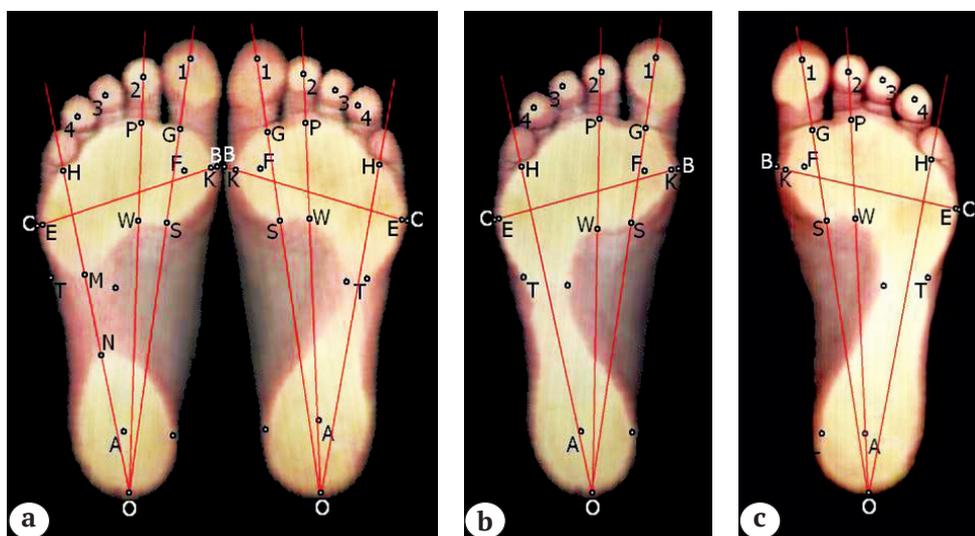


Рис. 2. Идентификационные точки плантограмм здорового ребенка, 12 лет: а — плантограмма при двуопорной нагрузке; б — плантограмма левой стопы при одноопорной нагрузке; с — плантограмма правой стопы при одноопорной нагрузке. Буквами на рисунках обозначены реперные точки

Fig. 2. Reference points on plantogramme of a healthy child, 12 y.o.: а — in double-bearing load; б — left foot in single-bearing load; с — right foot in single-bearing load. Letters indicate reference points.

При плантографическом исследовании детей со спондилолистезом L5 позвонка у 5 (41,6%) пациентов выявлена гипоплазия одной из стоп разной степени выраженности. Величина укорочения стопы составляла от 1 до 13 мм (среднее укорочение $5,7 \pm 1,86$ мм). С учетом того, что пациенты были разного возраста, укорочение стопы по сравнению с контралатеральной стороной выражали в относительных единицах измерения — от 1 до 9% (среднее укорочение $3,8 \pm 1,3\%$). При этом клиническими измерениями не было выявлено укорочения нижней конечности на стороне укороченной стопы, что исключало фактор асимметричности распределения нагрузки на подошвенную поверхность стоп. У 2 (17%) пациентов выявлено одностороннее продольное плоскостопие I степени, из них у одного ребенка наблюдалась разница в длине стоп — 7 мм, что составляет 4%, причем укороченная стопа не была уплощенной. Значения плантографических индексов обследованных детей представлены в таблице 1.

Анализ таблицы 1 показал, что у здоровых детей при переходе от двуопорной плантографии к одноопорной (то есть при двукратном увеличении нагрузки на стопу) произошло значимое изменение индексов опоры: увеличение t , m , s при уменьшении индекса l , что свидетельствует об

эластичности мягкотканых структур нормальной стопы. У пациентов со спондилолистезом L5 позвонка средняя величина индексов t и s оказалась значимо ниже аналогичных показателей здоровых детей как при двуопорной, так и при одноопорной нагрузке, что может быть связано с патологической тенденцией к супинационной установке стоп (рис. 3).

При этом наблюдалось, хотя и не значимое, снижение индекса m . Вместе с тем в тестах с повышением нагрузки на стопу у больных со спондилолистезом не происходило значимого увеличения средних показателей индексов t и m , что указывает на динамическую ригидность поперечного и внутреннего продольного сводов стоп у пациентов. Параметры индекса l у пациентов показали его значимое патологическое увеличение по сравнению с нормой при одноопорной нагрузке, что свидетельствует о статической ригидности наружного продольного свода, несмотря на сохранность его эластичности — значимое изменение этого показателя в процессе двукратного увеличения нагрузки.

Проведенный корреляционный анализ плантографических индексов позволил изучить взаимозависимость индексов опоры у здоровых и больных детей (табл. 2).

Таблица 1

Индексы опоры стоп здоровых детей и пациентов со спондилолистезом L5 позвонка

Индексы опоры ($\times 10^{-2}$)		Значения индексов опоры ($\times 10^{-2}$)				Критерий Манна – Уитни, p -value
		Здоровые дети		Дети со спондилолистезом		
		Me (Q1–Q2) $n = 12$	Критерий Вилкоксона	Me (Q1–Q2) $n = 12$	Критерий Вилкоксона	
t	Д	91,4 (92,2–95,6)	$Z = -3,140$ $p_3 = 0,02$	91,1 (87,4–93,2)	$Z = -0,684$ $p_6 = 0,494$	0,005
	О	96,8 (95,6–97,6)		92,6 (91,1–94,5)		0,000
m	Д	22,5 (20,1–23,2)	$Z = -4,167$ $p_3 = 0,000$	21,3 (17,2–23,3)	$Z = -0,657$ $p_6 = 0,511$	0,496
	О	25,0 (23,8–27,1)		23,5 (21,7–27,3)		0,170
s	Д	23,4 (22,3–24,8)	$Z = -3,198$ $p_3 = 0,001$	22,3 (19,6–24,5)	$Z = -2,029$ $p_6 = 0,043$	0,051
	О	26,2 (24,6–28,3)		23,5 (21,7–27,3)		0,031
l	Д	11,4 (0–28,1)	$Z = -3,516$ $p_3 = 0,000$	23,1 (15,6–38,1)	$Z = -3,362$ $p_6 = 0,001$	0,576
	О	0 (0–0)		9,2 (6,0–24,1)		0,015

Д — двуопорная плантография, О — одноопорная плантография; p_3 — уровень значимости изменения индексов опоры при переходе от двуопорной к одноопорной нагрузке у здоровых детей, p_6 — у больных; p -value — уровень значимости различия показателей между группами здоровых и больных детей.

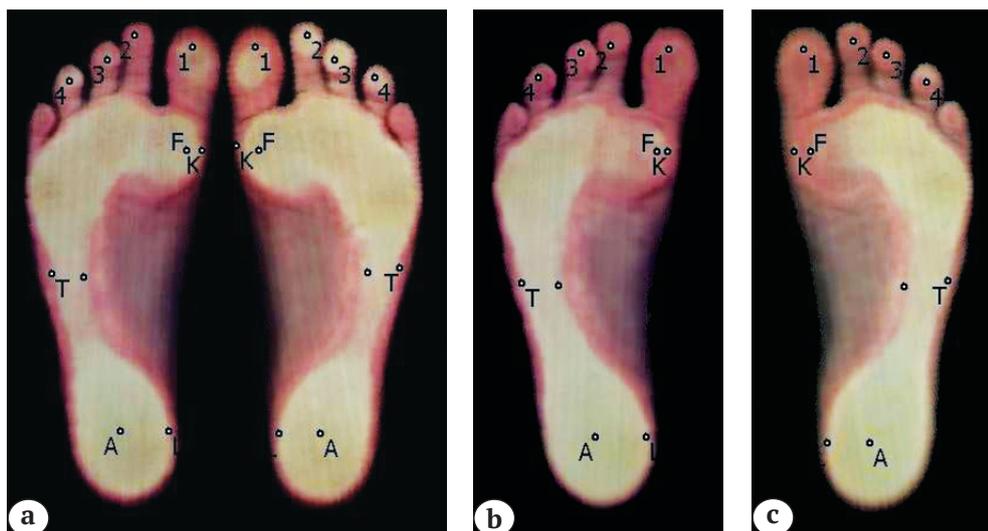


Рис. 3. Плантограммы стоп пациента, 13 лет, со спондилолистезом L5 позвонка IV степени:

a — при двуопорной нагрузке; b — при одноопорной нагрузке — левой стопы;

c — при одноопорной нагрузке — правой стопы. При одноопорной нагрузке выявляется супинация переднего отдела стоп, приводящая к снижению опорности головки первой плюсневой кости с обеих сторон

Fig. 3. Plantogrammes of patient, 13 y.o., L5 spondylolisthesis of grade IV:

a — at double-bearing load; b — at single-bearing load — left foot;

c — at single-bearing load — right foot. Supination of anterior foot is observed in single-bearing stance resulting in decrease of bearing ability of head of the first metatarsal at both feet

Таблица 2

Корреляционная связь между индексами опоры стоп у здоровых детей и пациентов с тяжелыми формами спондилолистеза L5 позвонка

Группа детей (стопы)	Коэффициент корреляции r_s					
	Двуопорная плантография			Одноопорная плантография		
	<i>m-t</i>	<i>s-t</i>	<i>m-s</i>	<i>m-t</i>	<i>s-t</i>	<i>m-s</i>
Здоровые (n = 24)	0,12 (p = 0,2125)	0,11 (p = 0,3696)	0,23 (p = 0,2892)	0,13 (p = 0,8547)	0,34 (p = 0,2698)	0,57 (p = 0,0911)
Со спондилолистезом (n = 24)	0,62 (p = 0,0662)	0,77 (p = 0,0325)	0,84 (p = 0,0000)	0,57 (p = 0,0601)	0,38 (p = 0,2165)	0,54 (p = 0,0019)

p — достигнутый уровень значимости полученной оценки коэффициента корреляции.

В группе здоровых детей при двуопорной нагрузке на стопы взаимосвязь между поперечным и продольными индексами опоры очень слабая и статистически незначимая, что свидетельствует о независимой нагружаемости сводов при равномерном распределении веса тела между стопами. При нагрузочных тестах, с попеременным переносом веса тела на каждую из стоп, у здоровых детей повышается связь между внутренним и срединным продольными сводами *m* и *s*, при этом уровень значимости коэффициента корреляции хотя и приближается к критическому значению 0,05, однако не достигает его. Необходимо подчеркнуть, что при этом связь между поперечным и продольными сводами стопы остается слабой и незначимой.

В группе пациентов со спондилолистезом L5 позвонка наблюдалась иная опорная стратегия стоп. При двуопорной нагрузке на стопы, в отличие от здоровых детей, выявлена сильная взаимосвязь между всеми сводами стоп. Корреляция между внутренним и срединным продольными сводами, а также между срединным продольным и поперечным сводами оказалась значимой.

При переходе к одноопорной нагрузке у обследованных пациентов, несмотря на повышение энергетических затрат для удержания равновесия, наблюдалась обратная реакция — не увеличение, а уменьшение функциональных взаимосвязей между сводами, которые характеризовались снижением всех коэффициентов корреляции, а значимость корреляционной связи сохранилась

только между внутренним и срединным продольными сводами.

Обсуждение

Стопа является одним из основных структурных сегментов опорно-двигательного аппарата человека, обеспечивающих его стато-локомоторную функцию, и представляет целостный морфофункциональный объект, от которого зависит двигательная функция человека [15]. В доступной литературе мы не нашли конкретной, инструментально подтвержденной информации, описывающей морфофункциональные характеристики стоп у детей со спондилолистезом L5 позвонка. Выявленное нами в настоящем исследовании одностороннее укорочение стоп у растущих пациентов со спондилолистезом L5 позвонка, с одной стороны, можно было бы объяснить гиподисплазией метаэпифизарного хряща костей вследствие трофических нарушений, как это показано в исследовании J.C. Nguyen с соавторами [16]. С другой стороны, в наших ранних исследованиях изменения в активности росткового хряща наблюдались и при полном исключении каких-либо клеточно-гуморальных воздействий на него [17]. Поэтому можно предположить, что у пациентов с заболеванием позвоночника замедление роста стопы происходило вследствие угнетения ростковых зон ее костей на фоне нарушения баланса распределения нагрузки в пределах стопы, что приводило к неадекватному изменению механических стимулов [18]. Известно, что одной из основных функций стопы является рессорная, которая заключается в способности сводов стопы гасить энергию удара, возникающего в момент касания стопы с опорой во время ходьбы или бега. Наибольшую амортизирующую роль играет внутренний продольный свод стопы, который в норме действует как пружина, смягчая толчки тела при контакте стопы с опорой. Мы в этой работе использовали метод функциональной плантографии, который, согласно данным В.С. Аносова с соавторами, позволяет сравнивать рессорную функцию стоп у здоровых и больных детей, а также констатировать ригидность стоп у пациентов со спондилолистезом [19]. Согласно результатам проведенного настоящего исследования, у больных со спондилолистезом L5 позвонка обнаружена ригидность сводов стоп, несмотря на сохранение признаков эластичности срединного и внутреннего продольных сводов.

Нами была выявлена у пациентов с тяжелыми формами спондилолистеза патологическая сильная функциональная взаимосвязь между сводами стопы при двуопорной нагрузке и ненормальное снижение связи между сводами при одноопорной нагрузке, что может указывать на неадекват-

ность рессорной и амортизационной функций сводов стопы вследствие их ригидности. Такие отличия в опорной стратегии стоп пациентов могут быть обусловлены нейромышечной дисфункцией нижних конечностей вследствие смещения позвонка L5, приводящего к компрессии корешков спинного мозга, сопровождающегося частичным блоком проведения компрессионно-ишемического характера на уровнях корешков L1–L5 позвонков. Такое нарушение афферентно-эфферентных взаимодействий нижних конечностей с ЦНС может приводить к ригидности сводов стоп [20] и нарушению их рессорной функции [21]. Мы предполагаем, что у детей со спондилолистезом на фоне вертебро-радикального конфликта изменяется кортикоспинальный механизм реализации акта опоры стоп, который обусловлен нарушениями прохождения афферентно-эфферентных сигналов. В условиях измененной центральной регуляции локомоторных функций у таких пациентов включаются адаптивные механизмы компенсации для поддержания равновесия тела. Весьма вероятно, что эти компенсаторные механизмы реализуются путём избирательного изменения активности и синхронизированности мышц голени, приводящего к смене стратегии арочного аппарата стоп [22]. На наш взгляд, такая адаптивная вновь сформированная опорная стратегия позволяет обеспечить поддержание вертикальной позы и возможность движения в неблагоприятных условиях функционирования. Таким образом, параметры плантографии могут свидетельствовать о перестройке нормальной моторной программы сложного акта стояния в организме пациентов с тяжелыми формами спондилолистеза L5 позвонка в патологическую.

Необходимо отметить отягощающее влияние ригидности стоп на состояние позвоночника. Известно, что в случае снижения упругих свойств стопы при ее ригидности понижаются амортизирующие ее свойства, что влечет за собой повышенную ударную нагрузку и усиление вибрационных воздействий на все располагающиеся выше суставы и органы [23]. Более ригидный мышечно-связочный аппарат стопы не может мягко поглотить значительную энергию приходящей на нее нагрузки, вследствие чего имеется высокая вероятность повреждения анатомических структур всего опорно-двигательного аппарата [24]. В результате позвоночник и спинной мозг большого ребенка становятся еще менее защищенными от внешних механических воздействий, получаемых в процессе ходьбы, бега и прыжков. В такой ситуации сниженная рессорная функция стопы не только не спасает позвонки от постоянной микротравматизации и связанных с ней дегенеративно-дистрофических процессов, но и неизбежно

приводит к быстрому прогрессированию необратимых заболеваний межпозвоночных сочленений [25].

Таким образом, имеющиеся изменения в стопе, сформировавшиеся как компенсаторный механизм в результате изменений в пояснично-крестцовом позвоночно-двигательном сегменте, оказывают отягощающее влияние, усиливая прогрессирование заболевания в процессе дальнейшего развития ребенка. Учитывая эти факты, определение упругих характеристик, а значит, и амортизационных свойств стоп у детей с тяжелыми формами спондилолистеза важно в целях ранней диагностики функционального состояния сводов стопы, нарушение которого приводит к неблагоприятным последствиям для всего опорно-двигательного аппарата и снижению его адаптивных возможностей.

У всех пациентов с тяжелыми формами спондилолистеза L5 позвонка данные плантографических исследований свидетельствуют о ригидности сводов стоп и нарушении их опорной стратегии. По сравнению со здоровыми детьми, опороспособность стоп у пациентов со спондилолистезом реализуется за счет патологического усиления функциональной взаимосвязи между сводами стопы при двуопорной нагрузке и аномального снижения взаимодействия между ними при одноопорной нагрузке. Необходимо учитывать отягощающее влияние ригидных стоп на состояние позвоночника и включать в план комплексной диагностики детей со спондилолистезом L5 позвонка изучение опорной функции стоп.

Этика публикации: исследование выполнено в соответствии с этическими принципами Хельсинкской декларации 2013 г. Протокол исследования был одобрен локальным этическим комитетом. У родителей всех участников исследования было получено письменное информированное согласие на участие в исследовании и публикацию данных.

Конфликт интересов: не заявлен.

Источник финансирования: государственное бюджетное финансирование.

Вклад авторов

Никитюк И.Е. — разработка дизайна исследования, сбор и статистическая обработка материала, обзор публикаций по теме статьи и написание текста рукописи.

Виссарионов С.В. — сбор и анализ материала, обзор публикаций по теме статьи, написание текста, этапное и заключительное редактирование рукописи.

Литература [References]

1. Скрыбин Е.Г. Спондилолиз и спондилолизный спондилолистез LV позвонка у детей дошкольного и младшего школьного возраста. *Вестник новых медицинских технологий*. 2014;21(3):72-75. DOI: 10.12737/5903. Skryabin E.G. [Spondylolysis and spondylolisthesis LV vertebra in the children of preschool and primary school]. *Vestnik novykh meditsinskikh tekhnologii* [Journal of New Medical Technologies]. 2014;21(3):72-75. (In Russian). DOI: 10.12737/5903.
2. Петров А.Г., Соколов А.О. Клинико-рентгенологическая диагностика спондилолистеза у детей. *Современные тенденции развития науки и технологий*. 2016;10(5):72-76. Petrov A.G., Sokolov A.O. [Clinical and radiological diagnosis of spondylolisthesis in children]. *Sovremennye tendentsii razvitiya nauki i tekhnologii*. 2016;10(5):72-76. (In Russian).
3. Gagnet P., Kern K., Andrews K., Elgafy H., Ebraheim N. Spondylolysis and spondylolisthesis: A review of the literature. *J Orthop*. 2018;15(2):404-407. DOI: 10.1016/j.jor.2018.03.008.
4. Шаповалов В.М., Надулич К.А., Теремшонок А.В., Ястребков Н.М. Отдаленные результаты хирургического лечения больных с истинным спондилолистезом методом изолированного переднего спондилодеза. *Травматология и ортопедия России*. 2012;(1):14-21. Shapovalov V.M., Nadulich K.A., Teremshonok A.V., Nagorny E.B., Yastrebkov N.M. [The long-term results of surgical treatment of patients with true spondylolisthesis using anterior lumbar interbody fusion]. *Travmatologiya i ortopediya Rossii*. [Traumatology and Orthopedics of Russia]. 2012;(1):14-21. (In Russian).
5. Дулаев А. К., Надулич К. А., Теремшонок А. В., Лебедев В.Б. Лечение пациентки с истинным спондилолистезом L5 позвонка IV степени. *Хирургия позвоночника*. 2006;1:62-65. Dulaev A.K., Nadulich K.A., Teremshonok A.V., Lebedev V.B. [A case of grade IV real L5 spondylolisthesis]. *Hirurgiya pozvonochnika* [Journal of Spine Surgery]. 2006;1:62-65. (In Russian).
6. Nagai K., Aoyama T., Yamada M., Izeki M., Fujibayashi S., Takemoto M. et al. Quantification of changes in gait characteristics associated with intermittent claudication in patients with lumbar spinal stenosis. *J Spinal Disord Tech*. 2014;27(4):136-142. DOI: 10.1097/BSD.0b013e3182a2656b.
7. Скрыбин Е.Г., Шарыпова А.А. Взаимосвязь заболеваний позвоночника и стоп у детей. *Медицинская наука и образование Урала*. 2016;17(2-86):45-48. Skryabin E.G., Scharypova A.A. [Relationship of diseases spine and feet in children]. *Meditsinskaya nauka i obrazovanie Urala*. 2016;17(2-86):45-48. (In Russian).
8. Ромакина Н.А., Федонников А.С., Киреев С. И., Бахтеева Н.Х., Норкин И.А. Использование методов биомеханики в оценке состояния и коррекции патологии опорно-двигательной системы (обзор). *Саратовский научно-медицинский журнал*. 2015;11(3):310-316. Romakina N.A., Fedonnikov A.S., Kireev S.I., Bakhteeva N.Kh., Norkin I.A. [Application of techniques of biomechanics in the status evaluation and pathology correction of locomotor system (review)]. *Saratovskii nauchno-meditsinskii zhurnal* [Saratov Journal of Medical Scientific Research]. 2015;11(3):310-316. (In Russian).

9. Перепелкин А.И., Гавриков К.В., Смаглюк Е.С., Сулейманов Р.Х. Морфофункциональные возрастные особенности стопы детей со сколиозом. *Вестник новых медицинских технологий*. 2010;17(2):232-233. Perpelkin A.I., Gavrikov K.V., Smaglyuk E.S., Suleimanov R.Kh. [Morphofunctional age-specific peculiarities of foot at children with scoliosis]. *Vestnik novykh meditsinskikh tekhnologii* [Journal of New Medical Technologies]. 2010;17(2):232-233. (In Russian).
10. Grivas T.B., Stavlas P., Koukos K., Samelis P., Polyzois B. Scoliosis and cavus foot. Is there a relationship? Study in referrals, with and without scoliosis, from school screening. *Stud Health Technol Inform*. 2002;88:10-14.
11. Meyerding H.W. Spondylolisthesis; surgical fusion of lumbosacral portion of spinal column and interarticular facets; use of autogenous bone grafts for relief of disabling backache. *J Int Coll Surg*. 1956;26(5 Part 1):566-591.
12. Годунов С.Ф. О плоскостопии у детей. *Ортопедия, травматология и протезирование*. 1968;1:40-48. Godunov S.F. [Flat feet in children]. *Ortopediya, travmatologiya i protezirovaniye* [Orthopaedics, Traumatology and Prosthetics]. 1968;1:40-48. (In Russian).
13. Никитюк И.Е., Мошонкина Т.Р., Щербаква Н.А., Виссарионов С.В., Умнов В.В., Рождественский В.Ю., и др. 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. Nikityuk I.E., Moshonkina T.R., Shcherbakova N.A., Vissarionov S.V., Umnov V.V., Rozhdestvenskii V.Yu., et al. [Effect of locomotor training and functional electrical stimulation on postural function in children with severe cerebral palsy]. *Fiziologiya cheloveka*. [Human Physiology]. 2016;42(3):37-46. (In Russian). DOI: 10.7868/S0131164616030127.
14. Menezes L.T., Barbosa P.H.F.A., Costa A.S., Mundim A.C., Ramos G.C., Paz C.C.S.C., et al. Baropodometric technology used to analyze types of weight-bearing during hemiparetic upright position. *Fisioterapia em Movimento*. 2012;25(3):583-594.
15. Ефимов А.П. Информативность биомеханических параметров походки для оценки патологии нижних конечностей. *Российский журнал биомеханики*. 2012;16(1):80-88. Efimov A.P. [Informativity of biomechanical parameters of gait for the estimation of the lower extremities pathology]. *Rossiiskii zhurnal biomekhaniki* [Russian Journal of Biomechanics]. 2012;16(1):80-88. (In Russian).
16. Nguyen J.C., Markhardt B.K., Mellow A.C., Dwek J.R. Imaging of Pediatric Growth Plate Disturbances. *Radiographics*. 2017;37(6):1791-1812. DOI: 10.1148/rg.2017170029.
17. Никитюк И.Е., Попов И.В., Полянский В.А., Дудкин В.И. Структура хряща метаэпифизарных пластинок роста в условиях полной изоляции от клеточно-гуморальных воздействий при пересадке в мягкие ткани (экспериментальное исследование). *Морфология*. 2007;131(3):45-49. Nikityuk I.E., Popov I.V., Polyanskii V.A., Dudkin V.I. Structure of metaepiphyseal growth plate cartilage as influenced by total isolation from cellular and humoral influences after its transplantation into soft tissues (an experimental study). *Morfologiya* [Morphology]. 2007;131(3):45-49. (In Russian).
18. Guevara J.M., Moncayo M.A., Vaca-González J.J., Gutiérrez M.L., Barrera L.A., Garzón-Alvarado D.A. Growth plate stress distribution implications during bone development: a simple framework computational approach. *Comput Methods Programs Biomed*. 2015;118(1):59-68. DOI: 10.1016/j.cmpb.2014.10.007.
19. Аносов В.С., Болтрукевич С.И., Михович М.С., Кочергин В.В. Динамическая фотоплантография с компьютерным анализом в диагностике и лечении продольного плоскостопия у детей. *Журнал Гродненского государственного медицинского университета*. 2005;3:151-155. Anosov V.S., Boltrukevich S.I., Mikhovich M.S., Kochergin V.V. [The computer-assisted dynamic photoplantography in the children longitudinal flatfoot diagnostics and treatment]. *Zhurnal Grodnenskogo gosudarstvennogo medicinskogo universiteta* [Journal of the Grodno State Medical University]. 2005;3:151-155. (In Russian).
20. Шалавина А.С., Ситдииков Ф.Г. Состояние и подготовленность продольного свода стопы младших школьников. *Фундаментальные исследования. Биологические науки*. 2013;11:954-957. Режим доступа: <https://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=33232>. Shalavina A.S., Sitdikov F.G. [Condition and preparedness of the longitudinal arch of foot of elementary school age children]. *Fundamental'nye issledovaniya. Biologicheskie nauki* [Fundamental research. Biological sciences]. 2013;11:954-957. (In Russian). Available from: <https://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=33232>.
21. Buldt A.K., Forghany S., Landorf K.B., Murley G.S., Levinger P., Menz H.B. Centre of pressure characteristics in normal, planus and cavus feet. *J Foot Ankle Res*. 2018;11:3-11. DOI: 10.1186/s13047-018-0245-6.
22. Аничков Н.М., Кудрявцев В.А., Минченко Н.Л. Клинико-морфологические параллели при распластанности переднего отдела стопы. *Травматология и ортопедия России*. 1995;1:15-18. Anichkov N.M., Kudryavtsev V.A., Minchenko N.L. [Clinical and morphological parallels in flatness of the forefoot]. *Travmatologiya i ortopediya Rossii* [Traumatology and Orthopaedics of Russia]. 1995;1:15-18. (In Russian).
23. Williams D.S., Tierney R.N., Butler R.J. Increased medial longitudinal arch mobility, lower extremity kinematics, and ground reaction forces in high-arched runners. *J Athl Train*. 2014;49(3):290-296.
24. Fouré A., Cornu C., McNair P.J., Nordez A. Gender differences in both active and passive parts of the plantar flexors series elastic component stiffness and geometrical parameters of the muscle-tendon complex. *J Orthop Res*. 2012;30(5):707-712.
25. Пономарева И.П., Дьякова Е.М., Сотников К.А., Крылов Д.В., Ващенко В.А. Анатомо-физиологические особенности стопы и причины развития ее возрастных изменений. *Фундаментальные исследования. Медицинские науки*. 2014;7:776-780. Режим доступа: <https://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=34980>. Ponomareva I.P., Dyakova E.M., Sotnikov K.A., Krylov D.V., Vashchenko V.A. [Condition and preparedness of the longitudinal arch of foot of elementary school age children]. *Fundamental'nye issledovaniya. Meditsinskie nauki* [Fundamental research. Medical sciences]. 2014;7:776-780. (In Russian). Available from: <https://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=34980>.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Никитюк Игорь Евгеньевич — канд. мед. наук, ведущий научный сотрудник лаборатории физиологических и биомеханических исследований, ФГБУ «Научно-исследовательский детский ортопедический институт им. Г.И. Турнера» Минздрава России, Санкт-Петербург

Виссарионов Сергей Валентинович — д-р мед. наук, профессор, заместитель директора по научной и учебной работе, руководитель отделения патологии позвоночника и нейрохирургии, ФГБУ «Научно-исследовательский детский ортопедический институт им. Г.И. Турнера» Минздрава России, Санкт-Петербург

INFORMATION ABOUT AUTHORS:

Igor E. Nikityuk — Cand. Sci. (Med.), leading research associate of the Laboratory of Physiological and Biomechanical Research, Turner Scientific Research Institute for Children's Orthopedics, St. Petersburg, Russian Federation

Sergey V. Vissarionov — Dr. Sci. (Med.), professor, deputy director for Research and Academic Affairs, head of the Department of Spinal Pathology and Neurosurgery, Turner Scientific Research Institute for Children's Orthopedics, St. Petersburg, Russian Federation

На первое полугодие 2020 года подписку на наш журнал можно оформить через объединенный каталог «Пресса России» в любом отделении почтовой связи.

Подписной индекс – 33020.

Также подписаться на журнал можно онлайн на сайтах www.ppressa-rf.ru и www.akc.ru.