

ФИЗИОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДВИГАТЕЛЬНОЙ АКТИВНОСТИ

DOI: 10.46742/2072-8840-2026-86-2-153-162

УДК: 617.3+ 612.13+ 159.922.761

ИЗМЕНЕНИЕ ФУНКЦИЙ НЕРВНО-МЫШЕЧНОЙ И СОСУДИСТОЙ СИСТЕМ НИЖНИХ КОНЕЧНОСТЕЙ У ДЕТЕЙ С ПЛОСКОСТОПИЕМ РАЗЛИЧНОЙ ЭТИОЛОГИИ

Васько О.Н.¹, Ильясевич И.А.^{1,2}, Соколовский О.А.¹

¹ГУ «Республиканский научно-практический центр травматологии и ортопедии»,
Минск

²Белорусский государственный университет, Минск
malina117@yandex.ru

АННОТАЦИЯ. Работа посвящена сравнительному изучению особенностей функционального восстановления физиологических систем нижних конечностей в двух группах детей с плоскостопием после ее хирургической коррекции: I группа – дети с плоскостопием без структурной патологии позвоночника; II группа – дети с плоскостопием и сопутствующей сколиотической деформацией позвоночника. Хирургическая коррекция плоскостопия в обеих группах сопровождалась восстановлением сниженных функций нервно-мышечных и сосудистых систем нижних конечностей. Однако во II группе, даже в отдаленные сроки после проведенного лечения, на фоне общего снижения двигательной и гемодинамической функций сегментов голени и стопы, сохранялись признаки сенсомоторной недостаточности нервных трактов спинного мозга.

Ключевые слова: плоскостопие, короткое ахиллово сухожилие, дети, нейрофизиологическое и доплерографическое исследование, хирургическая коррекция, сколиотическая деформация позвоночника

Vasko O.N., Ilyasevich I.A., Sakalouski O.A.

Changes in the functions of the neuromuscular and vascular systems of the lower extremities in children with flat feet of various etiologies

ABSTRACT. This article presents a comparative study of the functional recovery of lower extremity physiological systems in two groups of children with flat feet following surgical correction. Group I included children with flat feet and no underlying structural spinal pathology; group II included children with flat feet and concomitant scoliotic spinal deformity. Surgical correction of flat feet in both groups resulted in restoration of impaired neuromuscular and vascular function in the lower extremities. However, in group II, even late after treatment, despite a general decline in motor and hemodynamic function in the lower leg and foot segments, signs of sensorimotor impairment of the spinal cord nerve tracts persisted.

Keywords: *flat feet, short achilles tendon, children, neurophysiological and doppler ultrasound examination, surgical correction, scoliotic spinal deformity*

Данные официальной статистики и результаты научных исследований последних десятилетий свидетельствуют о том, что показатели здоровья у детей школьного возраста значительно снизились [1, 2]. Одной из наиболее часто встречаемых патологий являются заболевания костно-мышечной системы и сопутствующие ей функциональные нарушения, приводящие к снижению функции опорно-двигательного аппарата [6]. В первую очередь описываются такие патологические состояния как отклонения физиологической оси позвоночника (нарушение осанки, сколиоз, кифоз) и различного вида ортопедические деформации стоп. Данные литературы свидетельствуют, что значимые нарушения осанки характерны для 30-35% школьников в возрастном диапазоне 6-15 лет [6]. Согласно статистике, достаточно часто различные пороки развития костно-мышечного аппарата могут встречаться одновременно и оказывать взаимоотношающее влияние друг на друга [3, 5]. Этиология патологии, при которой имеется наличие двух различных заболеваний опорно-двигательного аппарата, связанных единым патогенетическим механизмом, остается малоизученной, что может служить причиной недостаточной эффективности ее диагностики и предпринимаемых мер коррекции [4, 7].

Цель – дать сравнительную нейрофизиологическую характеристику особенностей восстановления функций нервно-мышечного и сосудистого аппарата нижних конечностей у детей с двусторонним плоскостопием различной этиологии, после хирургической коррекции деформации стоп.

ОРГАНИЗАЦИЯ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Обследованы 22 мальчика с двусторонним плоскостопием, сопровождающимся укорочением ахиллова сухожилия, которые были разделены на две группы: I группа (n=12) – мальчики с деформацией стоп без структурной патологии позвоночника; II группа (n=10) – мальчики с деформацией стоп и сопутствующей S-образной грудопоясничной сколиотической деформацией позвоночника 3-4 степени. Изменения нейрофизиологических и доплерографических параметров определяли в обеих группах в динамике, на протяжении всего периода взросления этих детей от 4-7, далее 8-12 и до 13-16 лет. В период 10-12 лет всем

детям проводили хирургическую коррекцию компонентов деформации, суть которой заключалась в рассечении апоневроза икроножной мышцы в сочетании с артроризом подтаранного сустава. Контроль составили 18 здоровых мальчиков в возрасте 4-7, 8-12 и 13-16 лет.

С помощью суммарной электромиографии (ЭМГ) изучали функциональное состояние мышц нижних конечностей при помощи регистрации биоэлектрической активности (БА) при их максимальном напряжении.

Методом стимуляционной ЭМГ регистрировали Н- и М-потенциалы мышц голеней в ответ на электрическое раздражение большеберцового нерва в области подколенной ямки. Для анализа полученных данных использовали показатель рефлекторной возбудимости мышц голеней (N_{max}/M_{max}), определяемый в процентах (%) как отношение максимальной амплитуды М-ответа к максимальной амплитуде Н-рефлекса.

Для оценки проводимости восходящих нервных трактов спинного мозга (СМ) использовали метод соматосенсорных вызванных потенциалов (ССВП). Регистрировали коротколатентные ССВП-пики: сегментарный соматосенсорный пик (N_{22}), являющийся ответом нейронов поясничного утолщения СМ, и кортикальный соматосенсорный ответ (P_{37}), отражающий активацию соответствующей области первичной соматосенсорной коры. Оценивали амплитуду соматосенсорных потенциалов (мкВ), а также латентный период (мс). Рассчитывали время центрального сенсорного проведения импульса (*CCT – central conduction time*, $N_{22}-P_{38}$) по восходящим нервным трактам СМ как разницу латентных периодов кортикальных и сегментарных ССВП.

Для оценки состояния нисходящих моторных путей СМ и соответствующих двигательных корешков использовали метод транскраниальной магнитной стимуляции (ТМС). Синхронно с магнитной стимуляцией регистрировали кортикальные и сегментарные моторные ответы (МО) мышц стоп (*m. extensor digitorum brevis*). Магнитный койл последовательно располагали в проекции соответствующих зон моторной коры головного мозга и на уровне поясничного (L2-L3) отдела позвоночника. Оценивали амплитуду МО (мВ) и латентный период (мс). Рассчитывали величину времени центрального моторного проведения импульса (ВЦМП) по кортико-люмбальным трактам СМ как разницу латентных периодов кортикальных и сегментарных МО.

По данным доплерографических исследований магистральных артерий и вен (*aa. и vv. femoralis, femoris superficialis, profunda femoris, poplitea, tibialis anterior, dorsalis pedis, tibialis posterior*) определяли сред-

ную скорость кровотока ($V_{\text{сред.}}$, см/с), диаметр (D , см), а также рассчитывали кровяной поток (л/мин) по формуле $0,06\pi(D/2)^2V_{\text{сред.}}$.

Оборудование: нейроусреднитель «Нейро-МВП» (Нейрософт, Россия), ультразвуковой сканер «HD-15» (Philips, USA).

Статистическая обработка. Экспериментальные данные обрабатывали с помощью методов вариационной статистики (пакет прикладных программ «STATISTICA 12.0», StatSoft, США). Характер распределения анализировали с применением критерия Шапиро-Уилка. Применяли U критерий Манна-Уитни для независимых выборок и результаты представляли в виде медианы и интерквартильного размаха – Me (процентиль 25% – процентиль 75%). Различия считали достоверными при уровне значимости $p \leq 0,05$ при попарных сравнениях и $p \leq 0,01$ при множественных.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

По данным суммарной ЭМГ у мальчиков I и II групп в возрасте 4-7 лет с отмечалось выраженное уменьшение ($p \leq 0,05$) относительно контроля величин БА *m. tibialis anterior* на 20% и 35%, соответственно, *m. extensor hallucis longus* – на 25% и 40%, *m. triceps surae* – на 28% и 35%.

Анализ функционального состояния мышц бедренного сегмента свидетельствовал о снижении функций у мальчиков II группы в среднем на 15% ($p \leq 0,05$) относительно нормативного диапазона, в то время как у детей I группы двигательная активность указанных мышц находилась в пределах контроля (амплитуда БА *m. quadriceps* составили 465,0 [415,0-481,0] мкВ при контроле 468,0 [420,0-516,0] мкВ, $p \leq 0,05$).

По данным стимуляционной ЭМГ в обеих группах пациентов отмечалось уменьшение ($p \leq 0,05$) величин индекса $H_{\text{max}}/M_{\text{max}}$ у мальчиков с плоскостопием, сопровождающимся укорочением ахиллова сухожилия, без структурной патологии позвоночника, в среднем до уровня 50%, а у мальчиков, где патология развития стопы сопровождалась сколиотической деформацией позвоночника – до 43% (контроль – в среднем до 53%).

Результаты ССВП- и ТМС-исследования до операции в I группе мальчиков свидетельствовали об уменьшении величин амплитуд сегментарных сенсорных и моторных ответов на 29-33% ($p \leq 0,05$). В группе мальчиков с плоскостопием, сопровождающимся укорочением ахиллова сухожилия, и сопутствующей S-образной сколиотической деформацией позвоночника, наряду со снижением амплитудных характеристик сег-

ментарных ССВП- и МО-пиков на 45%, отмечалось удлинение значений показателя ССТ на 15-20% ($p \leq 0,05$).

По данным доплерографического исследования у пациентов I группы изучаемые параметры периферического кровотока соответствовали контролю, в то время как во II группе отмечалось увеличение уровня артериального кровенаполнения различных сегментов нижних конечностей (значения КП а. femoralis превосходили контроль на 50%, а. femoris superficialis – на 42%, а profunda femoris – на 20%, а. poplitea – на 46%, а. tibialis anterior – на 40 %, а. dorsalis pedis – на 32%, а. tibialis posterior – на 15%, $p \leq 0,05$).

По мере взросления в обеих группах пациентов отмечалось прогрессирующее снижение БА всех групп мышц нижних конечностей, с преимущественной выраженностью у детей II группы (рисунок 1).

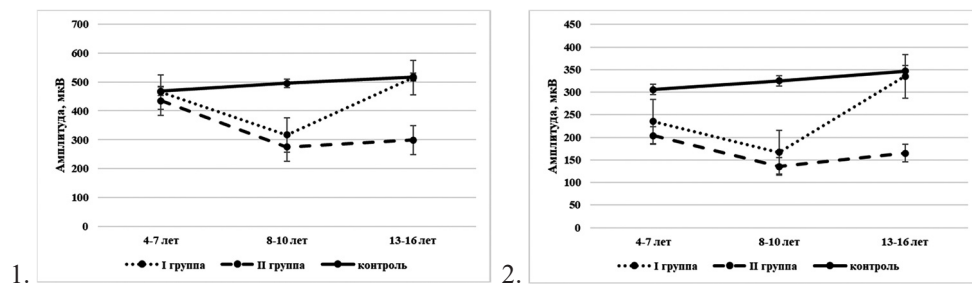


Рис. 1 – Изменение амплитуды биоэлектрической активности *m. vastus lateralis* (1) и *m. extensor hallucis longus* (2) у детей с двусторонним плоскостопием до и после хирургического лечения

Наряду со значимым уменьшением функций мышечного аппарата, наблюдалось постепенное снижение рефлекторной возбудимости мышц (значения индекса N_{\max}/M_{\max} составили в I и II группах 33% и 25%, соответственно) и сенсомоторной недостаточности нервных трактов СМ (таблица 1, 2).

Межгрупповым различием являлось то, что во II-ой группе, в отличие от группы, данные изменения отличались более широкой распространенностью: отмечался сенсомоторный дефицит не только на участке пояснично-крестцовых сегментов СМ, но и в вышележащих звеньях нервной системы, включая внутрицентральные афферентные пути спинного и головного мозга ($N_{22}-P_{37}$).

Ухудшение нервно-мышечных функций сопровождалось дальнейшей реорганизацией структуры периферического кровотока нижних

Таблица 1

Изменение параметров соматосенсорных вызванных потенциалов у детей с двусторонним плоскостопием до хирургического лечения

Параметр	Возрастные группы					
	4-7 лет			8-10 лет		
	I группа	II группа	контроль	I группа	II группа	контроль
Амплитуда N22, мкВ	2,7 [2,1-2,9]*	2,1 [1,6-2,5]*	4,0 [3,5-4,4]	2,5 [1,8-2,5]*	1,7 [1,0-2,0]*	4,2 [3,8-4,6]
Амплитуда P37, мкВ	3,8 [3,0-4,5]	3,3 [2,8-3,7]	4,0 [3,2-5,0]	3,6 [3,0-4,5]	2,7 [2,3-3,0]*	4,5 [4,0-5,3]
ССТ, мс (N22- P37)	19,0 [18,7-21,3]	21,0 [20,0-22,1]*	20,0 [19,5-21,4]	20,0 [18,0-21,0]*	20,8 [18,9-21,5]*	15,5 [15,0-16,8]

Примечание: * – изменения достоверны по отношению к контролю

Таблица 2

Изменение параметров транскраниальной магнитной стимуляции у детей с двусторонним плоскостопием до хирургического лечения

Параметр	Возрастные группы					
	4-7 лет			8-10 лет		
	I группа	II группа	контроль	I группа	II группа	контроль
Амплитуда кортикальных МО, мВ	1,0 [0,8-1,4]	0,9 [0,7-1,4]*	1,0 [0,6-1,5]	1,7 [1,1-2,0]	1,2 [0,9-1,5]*	1,5 [1,0-2,0]
Амплитуда сегментарных МО, мВ	3,8 [3,0-4,5]	2,3 [2,0-2,7]*	1,9 [1,5-3,0]	2,2 [1,1-2,9]*	1,7 [1,3-2,1]*	4,0 [3,2-4,8]
ВЦМП, мс	18,0 [16,7-19,3]	18,5 [17,0-21,0]	18,5 [13,0-21,0]	17,0 [16,5-17,4]	18,8 [18,0-19,1]*	17,0 [15,0-18,1]

Примечание: * – изменения достоверны по отношению к контролю

конечностей. По сравнению с младшей возрастной группой у детей 8-10 лет с плоскостопием без сопутствующей структурной патологии позвоночника до хирургического лечения наблюдали постепенное увеличение скоростей кровотока по магистральным артериям всех сегментов нижних конечностей (по артериям бедренно-подколенного сегмента на 15-20% по сравнению с контролем, по артериям берцового сегмента и стоп – на 50%, $p \leq 0,05$). Во II группе, напротив, отмечалось прогрессирующее уменьшение уровня артериального кровенаполнения в сегментах голени и стопы (значения КП артерий берцового сегмента и стоп были уменьшены на 25-30% относительно контроля, $p \leq 0,05$) в сочетании с его компенсаторным увеличением в области бедренного сегмента (значения КП артерий бедренного сегмента превосходили контроль на 60-70%, $p \leq 0,05$).

После хирургической коррекции компонентов деформации стопы у всех детей отмечалась тенденция к постепенному восстановлению нервно-мышечных и сосудистых функций. В I группе пациентов к 13-16 годам отмечалась полная нормализация изучаемых нейрофизиологических и доплерографических параметров (рисунок 2, 3).

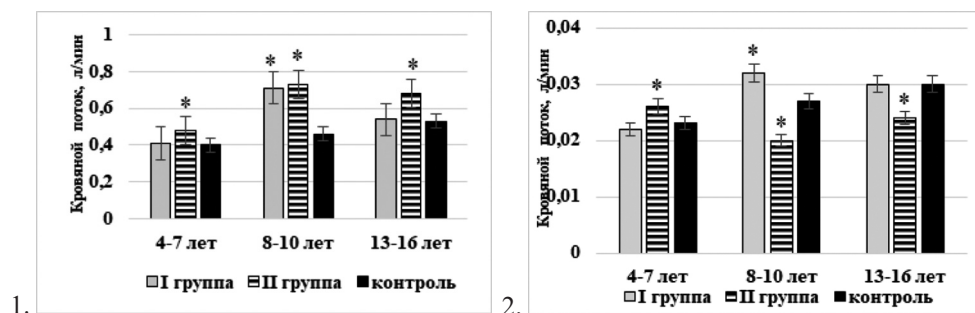


Рис.2 – Изменение уровня кровенаполнения *a. femoralis* (1) и *a. dorsalis pedis* (2) у детей с двусторонним плоскостопием до и после хирургического лечения

Примечание: * - изменения достоверны по отношению к контролю

В группе мальчиков, у которых плоскостопие сопровождалось наличием S-образной сколиотической деформации позвоночника, на фоне позитивной динамики величин БА мышц нижних конечностей, в 13-16 лет сохранялся дефицит сенсомоторной функции нервных трактов СМ (рисунок 3), выражавшийся в сохраняющемся уменьшении (на 30-50%, $p \geq 0,01$) величин амплитуд сегментарных ССВП-пиков и МО в сочетании с умеренным удлинением (на 10-15%, $p \geq 0,01$) значений ССТ

и ВЦМП ($p \geq 0,01$). Неполное восстановление нервно-мышечных функций сопровождалось в данной группе детей частичной нормализацией структуры регионарного кровотока, которая характеризовалась сохранением остаточного снижения артериального кровоснабжения тканей голеностопного сустава в сочетании с его увеличением в области бедер.

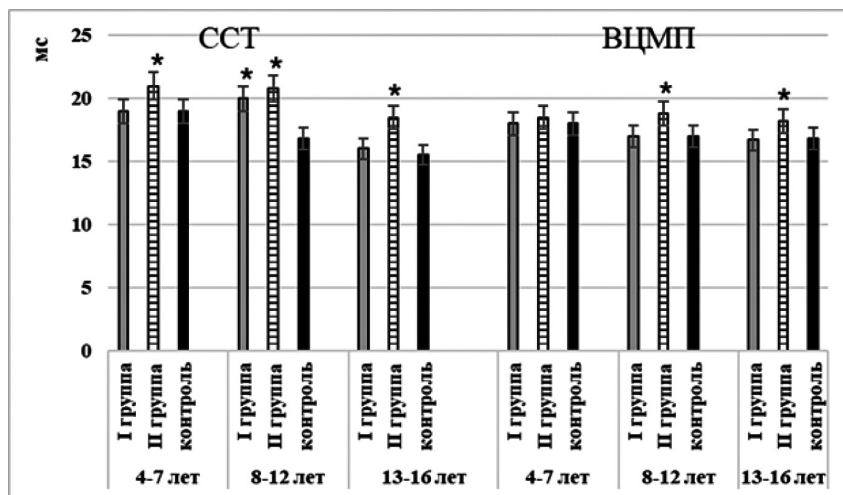


Рис. 3 Изменение величин показателей ССТ и ВЦМП у детей с двусторонним плоскостопием до и после хирургического лечения

Примечание: * - изменения достоверны по отношению к контролю

Таким образом, по сравнению с контролем у всех детей с плоскостопием, сопровождающимся укорочением ахиллова сухожилия, отмечалось снижение функционального состояния мышц бедер, голеней и стоп. Указанные изменения сопровождались сенсомоторным дефицитом функции пояснично-крестцовых сегментов СМ у детей I группы и признаками сенсомоторной недостаточности кортико-люмбального тракта у детей II группы. Нарушение нервно-мышечных функций у всех детей с плоскостопием сопровождалось перестройкой структуры регионарного кровотока нижних конечностей.

По мере взросления, на фоне имеющейся патологии стоп и позвоночника отмечалось нарастание дисфункций периферических и центральных звеньев нервно-мышечного аппарата, а также сосудистой системы.

Хирургическая коррекция компонентов деформации сопровождалась восстановлением сниженных функций. Однако у детей II группы с двусторонним плоскостопием и сколиотической деформацией позвоночника, несмотря на наличие позитивной динамики двигательной

активности мышц нижних конечностей, даже в отдаленные сроки восстановительного периода сохранялся сенсомоторный дефицит нервных трактов СМ, что, в свою очередь, ограничивало дальнейшую нормализацию сосудистых функций.

Полученные результаты имели практическое значение для формирования функционального прогноза и учитывались при проведении реабилитационных мероприятий.

Идея и планирование работы, сбор и обработка данных – Васько О.Н.

Написание и редактирование статьи – Васько О.Н., Ильясевич И.А., Соколовский О.А.

Информация о финансовой поддержке. Работа выполнена в подпрограмме подпрограммы «Хирургические методы медицинской профилактики, диагностики и лечения заболеваний» государственной научно-технической программы «Научно-техническое обеспечение качества и доступности медицинских услуг».

Этические нормы. Все исследования проведены в соответствии с принципами биомедицинской этики, сформулированными в Хельсинкской декларации 1964 г. и ее последующих обновлениях, и одобрены решением локального биоэтического комитета ГУ «Республиканский научно-практический центр травматологии и ортопедии» от 06.08.2024 г.

Информированное согласие. Законные представители пациентов подписывали информированное согласие на участие в обследовании согласно форме, утвержденной ученым советом РНПЦ Травматологии и ортопедии от 14 декабря 2022 года (протокол №15).

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белозерова Е.Ю., Сарапульцева П.А., Уточкин Ю.А. Нарушение опорно-двигательного аппарата у школьников // Наука через призму времени. – 2023. – № 12(81).
2. Литовченко О.Г., Закирова А.И. Функциональное состояние опорно-двигательного аппарата студентов (обзор литературы) // Российские биомедицинские исследования. – 2022. – Т. 7, № 3. – С. 43-50.
3. Маклакова О.А., Вандышева А.Ю., Толмачева О.Г., Эйсфельд Д.А. Особенности патологии опорно-двигательного аппарата у детей инновацион-

ного образовательного учреждения // Профилактическая и клиническая медицина. – 2020. – № 3(76). – С. 21-25.

4. Мамонова С.Б., Крылов В.Н., Сабурцев С.А. и др. Динамика некоторых вегетативных показателей у школьников при плоскостопии // Вестник новых медицинских исследований. – 2019. – Т. 26, № 4. – С.71-76.

5. Скрябин Е.Г., Шарыпова А.А. Взаимосвязь заболеваний позвоночника и стоп // Медицинская наука и образование Урала. – 2016. – № 2. – С. 45-48.

6. Юсупов З.Ш., Храмцов П.И. Концепция ранней диагностики деформации стоп у детей // Российский педиатрический журнал. – 2025. – № 28(4s). – С. 76-77.

7. Ablilash P.V., Roshan P.S.B., Anjana K. relationship between endurance and flat foot among college student // J. Sports Phys. Educ. – 2021. – Vol. 8, № 4. – P. 36-40.

REFERENCES

1. Belozeroва E.Yu., Sarapul'tseva P.A., Utochkin Yu.A. Narushenie oporno-dvigatel'nogo apparata u shkol'nikov // Nauka cherez prizmu vremeni. – 2023. – № 12(81).

2. Litovchenko O.G., Zakirova A.I. Funktsional'noe sostoyanie oporno-dvigatel'nogo apparata studentov (obzor literatury) // Rossijskie biomeditsinskie issledovaniya. – 2022. – Т. 7, № 3. – С. 43-50.

3. Maklakova O.A., Vandysheva A.Yu., Tolmacheva O.G., Ejsfel'd D.A. Osobennosti patologii oporno-dvigatel'nogo apparata u detej innovatsionnogo obrazovatel'nogo uchrezhdeniya // Profilakticheskaya i klinicheskaya meditsina. – 2020. – № 3(76). – С. 21-25.

4. Mamonova S.B., Krylov V.N., Saburtsev S.A., Saburtsev A.I., Martusevich A.K. Dinamika nekotorykh vegetativnykh pokazatelej u shkol'nikov pri plokostopii // Vestnik novykh meditsinskih issledovaniy. – 2019. – Т. 26, № 4. – С.71-76.

5. Skryabin E.G., Sharypova A.A. Vzaimosvyaz' zabolevanij pozvonochnika i stop // Meditsinskaya nauka i obrazovanie Urala. – 2016. – № 2. – С. 45-48.

6. Yusupov Z.Sh., Khramtsov P.I. Kontseptsiya rannej diagnostiki deformatsii stop u detej // Rossijskij pediatricheskij zhurnal. – 2025. – № 28(4s). – С.76-77.