

УДК 616.711-007.29-053.5/.6-089-07
DOI: <https://doi.org/10.17816/PTORS100676>

Оригинальное исследование



Исследование реакций сенсомоторной системы подростков в процессе и после хирургической коррекции деформации позвоночника

Е.Н. Щурова, М.С. Сайфутдинов, М.А. Ахмедова, Д.М. Савин, М.А. Богатырев

Национальный медицинский исследовательский центр травматологии и ортопедии имени академика Г.А. Илизарова, Курган, Россия

Обоснование. В литературе мало внимания уделено исследованию отсроченных реакций чувствительной и двигательной сфер подростков с деформациями позвоночника после оперативного лечения.

Цель — исследовать реакции сенсомоторной системы подростков после хирургической коррекции деформации позвоночника.

Материалы и методы. Проанализирована динамика состояния чувствительной и двигательных сфер в ближайший период после оперативного лечения деформации позвоночника у 21 подростка с идиопатическим сколиозом и у 13 с врожденными деформациями позвоночника. В работе использован комплекс методов глобальной и стимуляционной электронной миографии. Оценивали амплитуду моторных, рефлекторных потенциалов и интерференционной электромиограммы при максимальном произвольном напряжении мышц нижних конечностей. С помощью эстезиометра исследовали температурно-болевую чувствительность в дерматомах Th₁-S₂. В процессе хирургической коррекции выполнен интраоперационный нейромониторинг с регистрацией моторных вызванных потенциалов мышц нижних конечностей.

Результаты. В начале операционного вмешательства у всех пациентов получены высокоамплитудные хорошо воспроизводимые моторные вызванные потенциалы. В группе пациентов с идиопатическим сколиозом по сравнению с группой с врожденными деформациями преобладало ($p > 0,05$) спокойное течение оперативного вмешательства без существенных изменений моторных вызванных потенциалов относительно базового уровня ($p > 0,05$). Количество наблюдений опасного снижения показателей моторных вызванных потенциалов в обеих группах сравнения не превышало 10 %, различия статистически не значимы ($p > 0,05$). При изучении реакций сенсомоторной системы в ближайшем послеоперационном периоде выявлено увеличение амплитуды М-ответов *m. rectus femoris*, *m. flexor digitorum brevis*, *m. gastrocnemius*, снижение амплитуды суммарной электромиографии *m. rectus femoris*. Показатели Н-рефлексов оставались на дооперационном уровне. При анализе температурно-болевой чувствительности обнаружена более выраженная реакция в сравнении с моторным компонентом. Изменения показателей этого вида чувствительности в группах подростков с идиопатическим сколиозом и врожденными деформациями носили противоположный характер. При идиопатическом сколиозе преобладала отрицательная динамика чувствительности, у подростков с врожденными деформациями — положительная. Данный факт обусловлен тем, что величина коррекции основной и компенсаторных дуг деформации в группе обследуемых с идиопатическим сколиозом была больше на 48 % ($p = 0,0004$) и 51 % ($p = 0,011$) соответственно.

Заключение. После хирургической коррекции деформаций позвоночника подростков реакции сенсорной системы температурно-болевой чувствительности более выражены, чем моторной сферы.

Ключевые слова: идиопатический сколиоз; врожденные деформации позвоночника; подростки; хирургическая коррекция деформации; моторные вызванные потенциалы; М-ответы; Н-ответы; электромиография (ЭМГ); температурно-болевая чувствительность; интраоперационный мониторинг.

Как цитировать:

Щурова Е.Н., Сайфутдинов М.С., Ахмедова М.А., Савин Д.М., Богатырев М.А. Исследование реакций сенсомоторной системы подростков в процессе и после хирургической коррекции деформации позвоночника // Ортопедия, травматология и восстановительная хирургия детского возраста. 2022. Т. 10. № 2. С. 129–142. DOI: <https://doi.org/10.17816/PTORS100676>

DOI: <https://doi.org/10.17816/PTORS100676>

Original Study Article

Study of reactions of the sensorimotor system in adolescents during and after surgical correction of spinal deformity

Elena N. Shchurova, Marat S. Saifutdinov, Mekhriban A. Akhmedova, Dmitry M. Savin, Maksim A. Bogatyrev

National Ilizarov Medical Research Centre for Traumatology and Orthopaedics, Kurgan, Russia

BACKGROUND: Little attention has been paid to the study of delayed sensory and motor reactions in adolescents with spinal deformities after surgical treatment.

AIM: To study the reactions of the sensorimotor system of adolescents after surgical correction of spinal deformity.

MATERIALS AND METHODS: The state of the sensory and motor spheres was analyzed in the immediate postoperative period in 21 adolescents with idiopathic scoliosis and in 13 with congenital deformities of the spine. A complex of methods involving global and stimulation electroneuromyography was used. The amplitude of motor, reflex potentials and interference electromyogram was evaluated at the maximum arbitrary tension of the lower limb muscles. Using an esthesiometer, thermal pain sensitivity in Th1–S2 dermatomes was explored. In the process of surgical correction, intraoperative neuro-monitoring was performed with registration of motor evoked potentials of the lower limb muscles.

RESULTS: At the beginning of surgical intervention, high-amplitude, well-reproducible motor evoked potentials were obtained in all patients. In the group of patients with idiopathic scoliosis, compared with those with congenital deformities, smooth flow of surgery prevailed ($p > 0.05$) without significant changes in motor potentials relative to the baseline ($p > 0.05$). The number of observations of motor potentials decreased in the both groups and did not exceed 10%; the differences were not significant ($p > 0.05$). The study of the reactions of the sensorimotor system in the immediate postoperative period triggered an increase in the amplitude of M-responses of *m. rectus femoris*, *m. flexor digitorum brevis*, *m. gastrocnemius*, and a decrease in the amplitude of the total EMG of *m. rectus femoris*. Values of H-reflexes remained at the preoperative level. The analysis of thermal pain sensitivity demonstrated the presence of a more pronounced reaction than that of the motor component. Changes in indicators of this type of sensitivity in groups of adolescents with idiopathic and congenital scoliosis were opposite. In idiopathic scoliosis, negative dynamics of the values prevailed, while in adolescents with congenital deformities of the spine, positive dynamics prevailed. This was because the amount of correction of the main and compensatory curves of the deformity in the group with idiopathic scoliosis was 48% greater ($p = 0.0004$) and 51% greater ($p = 0.011$), respectively.

CONCLUSIONS: After surgical correction of spinal deformities in adolescents, the reactions of the sensory system of thermal pain sensitivity were more pronounced than those of the motor sphere.

Keywords: idiopathic scoliosis; congenital deformities of the spine; adolescents; surgical correction of the deformity; motor evoked potentials; M-responses; H-responses; EMG; thermal pain sensitivity; intraoperative monitoring.

To cite this article:

Shchurova EN, Saifutdinov MS, Akhmedova MA, Savin DM, Bogatyrev MA. Study of reactions of the sensorimotor system in adolescents during and after surgical correction of spinal deformity. *Pediatric Traumatology, Orthopaedics and Reconstructive Surgery*. 2022;10(2):129–142. DOI: <https://doi.org/10.17816/PTORS100676>

Received: 14.02.2022

Accepted: 14.04.2022

Published: 30.06.2022

ОБОСНОВАНИЕ

Несмотря на все фундаментально-прикладные исследования, преимущества современных методов и металлоконструкций, которые используют для коррекции деформации позвоночника, повреждение спинного мозга остается грозным последствием такого состояния [1, 2]. Одно из самых серьезных осложнений — неврологический дефицит, частота которого колеблется от 0,37 до 10 % [3].

Повреждение спинного мозга может произойти после хирургических мероприятий, включающих коррекцию сколиоза и кифоза, поскольку эти манипуляции продуцируют удлинение позвоночного столба, придают существенное напряжение спинному мозгу, что может привести к пролонгированной травме [2].

Анализ данных литературы показывает, что частота distractionных повреждений спинного мозга увеличивается с использованием растущей стержневой системы, которую широко применяют для коррекции деформаций позвоночника [4, 5]. Кроме того, количество инцидентов tractionных повреждений спинного мозга со временем возросло с 0,72 % в 1975 г. [6] до 1 % в 1987 г. [7] и достигло 17 % в 2011 г. [8].

Большинство исследователей сходятся во мнении, что во время коррекции деформаций позвоночника чрезмерная distraction служит основной причиной повреждений и нарушений функций спинного мозга [9, 10].

В настоящее время хирурги спорят об оптимальной длине и времени distraction, чтобы избежать паралича [1, 11, 12]. Однако на экспериментальной модели показано, что гипоксические события даже во время небольшой distraction позвоночника (при отсутствии открытых механических или сосудистых повреждений спинного мозга) могут привести к метаболическим ухудшениям в моторных спинальных нейронах и постоянным функциональным дефицитам [2, 13]. Вместе с тем другие авторы свидетельствуют, что при незначительной distraction позвоночника

(когда амплитуда вызванных потенциалов спинного мозга составляет 80–100 % нормы) кровоток спинного мозга увеличивался [14, 15]. Кроме того, при остром или постепенном удлинении позвоночного столба обезьян дисфункция спинного мозга возникает в результате избыточного растягивающего напряжения (влияющего на проводниковые пути) и отсроченного начала ишемии спинного мозга в верхней части грудного отдела, которая может быть результатом аналогичного механического процесса, действующего на внутренние кровеносные сосуды спинного мозга [16].

Отсроченный послеоперационный неврологический дефицит — потенциально опасное состояние после коррекции кифосколиотической деформации позвоночника. Неврологические нарушения возникают в течение нескольких часов или дней после хирургической процедуры. На эту тему опубликованы единичные сообщения [4, 17, 18].

Если изменения состояния сенсомоторной системы носят субклинический характер, они чаще всего остаются за рамками внимания врачей и исследователей, поэтому отсроченные послеоперационные реакции чувствительной и двигательной сфер подростков со сколиозом различного генеза на оперативное лечение необходимо дополнительно исследовать [19–21].

Цель — исследовать реакции сенсомоторной системы подростков после хирургической коррекции деформации позвоночника.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для достижения поставленной цели обследовано 34 пациента с деформацией позвоночника в возрасте от 11 до 18 лет. В зависимости от этиологии заболевания обследуемые были распределены на две группы: 1) 21 подросток с идиопатическим сколиозом; 2) 13 подростков с врожденными деформациями позвоночника. Контрольную группу составили 32 здоровых ребенка в возрасте от 11 до 17 лет.

Таблица 1. Характеристика обследуемых подростков ($M \pm m$)

Показатели	Группы подростков		
	здоровые $n = 32$	с идиопатическим сколиозом, $n = 21$	с врожденными деформациями позвоночника, $n = 13$
Возраст, годы	$14,5 \pm 1,6$ (диапазон — 11–17)	$15,0 \pm 0,36$ (диапазон — 12–18)	$14,0 \pm 0,6$ (диапазон — 11–17)
Пол	Мальчики — 15; девочки — 17	Мальчики — 6; девочки — 15	Мальчики — 7; девочки — 6
Рост, см	$161,0 \pm 1,1$	$161,2 \pm 1,6$	$150,0 \pm 3,0^*$
Вес, кг	$54,0 \pm 1,2$	$53,2 \pm 2,3$	$46,1 \pm 2,2^*$
ИМТ, кг/м ²	$20,8 \pm 0,3$	$20,6 \pm 0,9$	$20,5 \pm 0,8$
Угол основной дуги деформации, °	—	$51,3 \pm 3,3$	$61,5 \pm 4,9$
Угол компенсаторной дуги деформации, °	—	$34,0 \pm 4,7$ $n = 10$	$52,6 \pm 5,0^*$ $n = 9$

* достоверность отличия от показателей здоровых подростков, $p < 0,05$. ИМТ — индекс массы тела.

При сравнительном анализе антропометрических показателей установлено, что у подростков с идиопатическим сколиозом перед операцией рост, вес и индекс массы тела достоверно не отличались от показателей здоровых сверстников (табл. 1).

Подростки с врожденным сколиозом были ниже ($-7,2\%$, $p = 0,00035$) и имели меньший вес ($-13,4\%$, $p = 0,041$), чем здоровые дети и подростки с идиопатическим сколиозом. Однако индекс массы тела не отличался от значений других групп обследуемых ($p = 0,589$). Величина угла основной дуги в группе пациентов с идиопатическим сколиозом не отличалась от значений этого показателя у подростков с врожденным сколиозом ($p = 131$). Компенсаторная дуга была меньше на 35% ($p = 0,016$).

У подростков с идиопатическим сколиозом не выявлено двигательных, рефлекторных и чувствительных нарушений. Были определены различные изменения позвонков на вершине деформации (компьютерная томография): деформация тела позвонка, истончение дуг, ротация. Размеры позвоночного канала не уменьшены, компрессия его структур отсутствовала. Основная дуга деформации располагалась на уровне позвонков Th_7 – Th_{12} , компенсаторная — на уровне позвонков L_1 – L_3 .

При исследовании подростков с врожденными деформациями позвоночника обнаружены различные аномалии развития позвонков: клиновидные и бабочковидные позвонки, полупозвонки, блок позвонков, нарушения сегментации и развития позвонков. Из 13 пациентов у 7 был диагностирован сколиоз, в 4 случаях выявлен кифосколиоз с ведущим сколиотическим компонентом, у двух больных — кифоз.

У пациентов с врожденным сколиозом не было интраканальных аномалий. Основная дуга деформации позвоночника располагалась на уровне позвонков Th_6 – L_4 , компенсаторная — на уровне позвонков Th_9 – L_3 . У 3 (21%) больных зарегистрированы двигательные нарушения: нижний монопарез справа, нижний спастический парепарез.

Для исследования отсроченных реакций сенсомоторной системы подростков после коррекции деформации позвоночника была проанализирована динамика состояния чувствительной и двигательных сфер в ближайший послеоперационный период (через 6–21 день, в среднем через $11,2 \pm 0,9$ дня).

В процессе исследования оценивали амплитуды моторных (М-ответов), рефлекторных (Н-ответов) потенциалов и интерференционной электромиограммы (ЭМГ) при максимальном произвольном напряжении мышц нижних конечностей. ЭМГ-обследование выполняли согласно дизайну, разработанному А.П. Шеиным [20], с помощью цифровой системы Viking EDX (Natus Medical Incorporated, США). В качестве нормы (контрольная группа) использованы ранее опубликованные данные [22].

С применением электрического эстезиометра (термистор фирмы EPCOS Inc., Германия) определяли температурно-болевою чувствительность в дерматомах Th_1 – S_2 .

В качестве контрольной группы обследованы 32 здоровых подростка в возрасте от 11 до 17 лет.

Подросткам с деформацией позвоночника выполняли хирургическую коррекцию. В процессе оперативного вмешательства осуществляли одномоментную коррекцию и стабилизацию деформации позвоночника системами транспедикулярной фиксации. Остеосинтез позвоночника проводили согласно концепции CDI (Cotrel-Dubousset Instrumentation), уровень фиксации зависел от типа сколиоза по Lenke.

С помощью системы ISIS IOM (Inomed Medizintechnik GmbH, Германия) выполняли интраоперационный нейромониторинг с регистрацией моторных вызванных потенциалов (МВП) мышц нижних конечностей при стимуляции соответствующих проекционных зон моторной коры [23].

Статистическую обработку результатов осуществляли в программе Microsoft Excel 2010, надстройка AtteStat (Россия), и статистической программе SPSS (SPSS Inc., Чикаго, Иллинойс, США). Нормальность распределения исследуемых данных проверяли с использованием критериев Шапиро – Уилка и Колмогорова – Смирнова. При нормальном типе распределения значимость изменений оценивали с помощью параметрического t -критерия Стьюдента, после оценки условия равенства дисперсий с применением критерия Ливина. В случае отсутствия нормального распределения использовали непараметрический принцип статистической обработки. Частоту встречаемости (в %, f) разных вариантов реакции пирамидной системы на коррекцию деформации позвоночника рассчитывали как отношение количества наблюдений (n) разных вариантов нейромониторинга к общему количеству наблюдений (N). Значимость различий между ними оценивали с помощью Z -критерия разности долей и критерия χ^2 . Критический уровень значимости при проверке статистических результатов принимали равным 0,05.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Анализ величины коррекции деформации показал, что при идиопатическом сколиозе уменьшение деформации в основной и компенсаторной дуге составляло $77,8 \pm 4,0$ и $72,0 \pm 5,2\%$ соответственно (табл. 2). У подростков с врожденными деформациями позвоночника величина коррекции были меньше: в основной дуге — $52,0 \pm 5,9\%$, в компенсаторной — $48,0 \pm 6,5\%$ (табл. 3).

В начале операционного вмешательства у всех пациентов были получены высокоамплитудные хорошо воспроизводимые МВП, выступавшие в качестве базового уровня состояния проводящих путей спинного мозга. На рис. 1 отражены варианты динамики МВП в процессе хирургической коррекции деформации позвоночника.

Диаграмма показывает, что в группе пациентов с идиопатическим сколиозом по сравнению с пациентами с врожденными деформациями преобладает ($p > 0,05$) спокойное течение оперативного вмешательства

Таблица 2. Величины коррекции деформации позвоночника подростков с идиопатическим сколиозом ($M \pm m, n = 21$)

Показатель	До лечения	После лечения	Величина изменения, %
Угол основной дуги деформации, °	51,3 ± 3,3 (35–85)	12,7 ± 2,9* (0–50) $p = 0,00006$	77,8 ± 4,0 (25–100)
Угол компенсаторной дуги деформации, °	34,0 ± 4,7 (15–65)	10,6 ± 3,5* (3–40) $p = 0,0051$	72,0 ± 5,2 (39–88)

* достоверность отличия от показателей дооперационного уровня, $p < 0,05$.

Таблица 3. Величины коррекции деформации позвоночника подростков с врожденными деформациями позвоночника ($M \pm m, n = 13$)

Показатель	До лечения	После лечения	Величина изменения, %
Угол основной дуги деформации, °	61,5 ± 4,9 (40–81)	30,0 ± 4,1* (11–60) $p = 0,0004$	52,0 ± 5,9 (20–77)
Угол компенсаторной дуги деформации, °	52,6 ± 5,0 (35–80)	28,4 ± 5,1* (15–61) $p = 0,0054$	48,0 ± 6,5 (24–77)

* достоверность отличия от показателей дооперационного уровня, $p < 0,05$.

без существенных изменений МВП относительно базового уровня ($p > 0,05$).

Данный вариант реакции не указывает на возникновение опасности для проводящих путей спинного мозга, но может быть предшественником опасной ситуации [24]. Количество наблюдений опасного снижения МВП в обеих группах сравнения не превышало 10 %, различия статистически не значимы ($p > 0,05$) (см. рис. 1). В подобных ситуациях действия хирурга были скорректированы [23, 24]. После окончания операции в анализируемой выборке не выявлено ни одного случая клинического проявления вновь приобретенного моторного дефицита.

Оценка реакций сенсомоторной системы подростков с идиопатическим сколиозом на коррекцию деформации позвоночника в послеоперационном периоде продемонстрировала неоднозначность выраженности изменений в двигательной и чувствительной сферах.

По результатам анализа реакций нейромышечного аппарата на коррекцию деформации позвоночника отмечена незначительная динамика. Наблюдалось увеличение амплитуды М-ответов *m. rectus femoris* (на 4 %, $p = 0,008$), *m. flexor digitorum brevis* (на 7 %, $p = 0,001$), *m. gastrocnemius* (на 5 %, $p = 0,008$) (табл. 4).

Отсутствовали изменения амплитуды суммарной ЭМГ *m. tibialis anterior*, *m. gastrocnemius*, частоты суммарной ЭМГ *m. rectus femoris*, *m. tibialis anterior*. Достоверно уменьшилась амплитуда суммарной ЭМГ *m. rectus femoris* (на 15,4 %, $p = 0,005$) и частота *m. gastrocnemius* (на 9 %, $p = 0,042$). Амплитуда Н-рефлексов в послеоперационном периоде соответствовала исходному уровню. Так, у *m. gastrocnemius* она до операции составила $4,9 \pm 0,6$ мВ, после — $5,0 \pm 0,6$ мВ. При исследовании *m. soleus* установлено, что величина амплитуды Н-рефлексов после

операции ($6,7 \pm 1,1$ мВ) достоверно не отличалась от дооперационного уровня ($6,2 \pm 0,9$ мВ, $p = 0,21$).

При исследовании динамики показателей температурно-болевого чувствительности у подростков с идиопатическим сколиозом зарегистрированы выраженные реакции данной сенсорной системы. Так, анализ тепловой чувствительности в среднем по выборке показал уменьшение случаев нормальных (на 54,1 %, с $15,7 \pm 3,6$ до $7,2 \pm 2,8$ %, $p = 0,0001$) и повышенных (на 20 %,

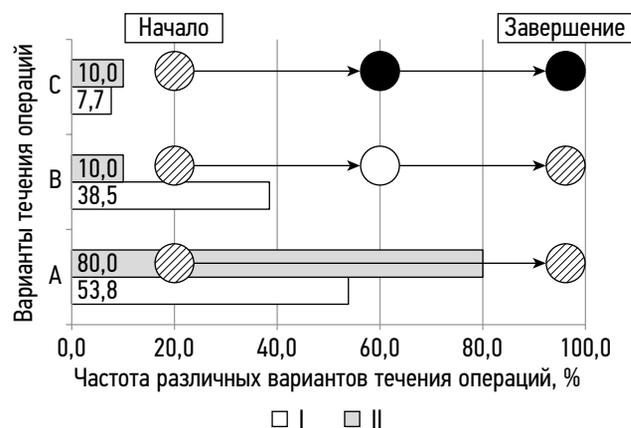
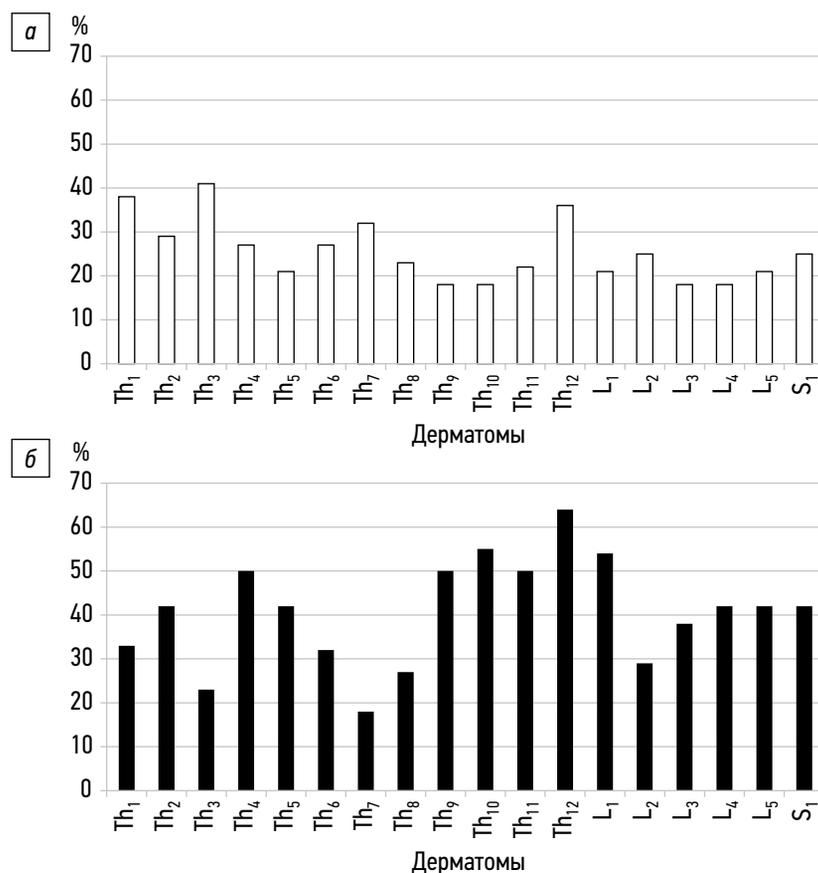


Рис. 1. Динамика моторных вызванных потенциалов (МВП) в процессе оперативной коррекции деформации позвоночника у пациентов с врожденной деформацией (I) и идиопатическим сколиозом (II). Ось абсцисс — частота (%) различных вариантов операции. Ось ординат — варианты операции: А — спокойное протекание оперативного вмешательства; В — появление нестабильных по форме и характеристикам МВП; С — опасное снижение амплитуды МВП. Штриховка — высокоамплитудные стабильные базовые МВП и ответы, сохранившиеся на базовом уровне в конце операции. Белый цвет — нестабильные по форме и характеристикам МВП. Черный цвет — критическое снижение амплитуды МВП

Таблица 4. Показатели амплитуды М-ответов и суммарной электромиографии мышц нижних конечностей подростков с идиопатическим сколиозом до и после коррекции деформации ($M \pm m$)

Мышцы	Амплитуда М-ответов, мВ			Показатели суммарной электромиографии			
	контрольная группа	до коррекции	после коррекции	до коррекции		после коррекции	
				амплитуда, мВ	частота, турн/с	амплитуда, мВ	частота, турн/с
<i>M. rectus femoris</i>	21,7 ± 0,7 <i>n</i> = 32	19,6 ± 0,6 <i>2n</i> = 36	20,4 ± 0,5* <i>2n</i> = 36 <i>p</i> = 0,008	0,38 ± 0,03 <i>2n</i> = 40	252,0 ± 13,0 <i>2n</i> = 32	0,32 ± 0,03* <i>2n</i> = 40 <i>p</i> = 0,005	276,0 ± 19,0 <i>2n</i> = 32 <i>p</i> = 0,083
<i>M. tibialis anterior</i>	7,7 ± 0,3 <i>n</i> = 32	8,6 ± 0,3 <i>2n</i> = 36	8,6 ± 0,3 <i>2n</i> = 36	0,47 ± 0,02 <i>2n</i> = 40	368,0 ± 16,0 <i>2n</i> = 32	0,50 ± 0,03 <i>2n</i> = 40 <i>p</i> = 0,21	357,0 ± 18,8 <i>2n</i> = 32 <i>p</i> = 0,176
<i>M. extensor digitorum brevis</i>	10,6 ± 0,7 <i>n</i> = 32	8,3 ± 0,5 <i>2n</i> = 36	8,7 ± 0,5 <i>2n</i> = 36	–	–	–	–
<i>M. flexor digitorum brevis</i>	17,0 ± 1,1 <i>n</i> = 32	19,3 ± 0,8 <i>n</i> = 38	20,6 ± 1,0* <i>n</i> = 38 <i>p</i> = 0,001	–	–	–	–
<i>M. gastrocnemius</i>	31,5 ± 1,2 <i>n</i> = 32	30,0 ± 1,3 <i>2n</i> = 36	31,4 ± 1,2* <i>2n</i> = 36 <i>p</i> = 0,008	0,22 ± 0,02 <i>2n</i> = 40	358,4 ± 20,0 <i>n</i> = 32	0,23 ± 0,02 <i>n</i> = 40	325,8 ± 16,8* <i>2n</i> = 32 <i>p</i> = 0,042

* достоверность отличия от дооперационного уровня, $p < 0,05$. $2n$ — количество конечностей. Турн — изменение направления кривой на электромиограмме с амплитудой кривой не менее 100 мкВ.

**Рис. 2.** Улучшение (а) и ухудшение (б) тепловой чувствительности (в %) у подростков с идиопатическим сколиозом через 12,0 ± 1,2 дня после оперативной коррекции деформации позвоночника

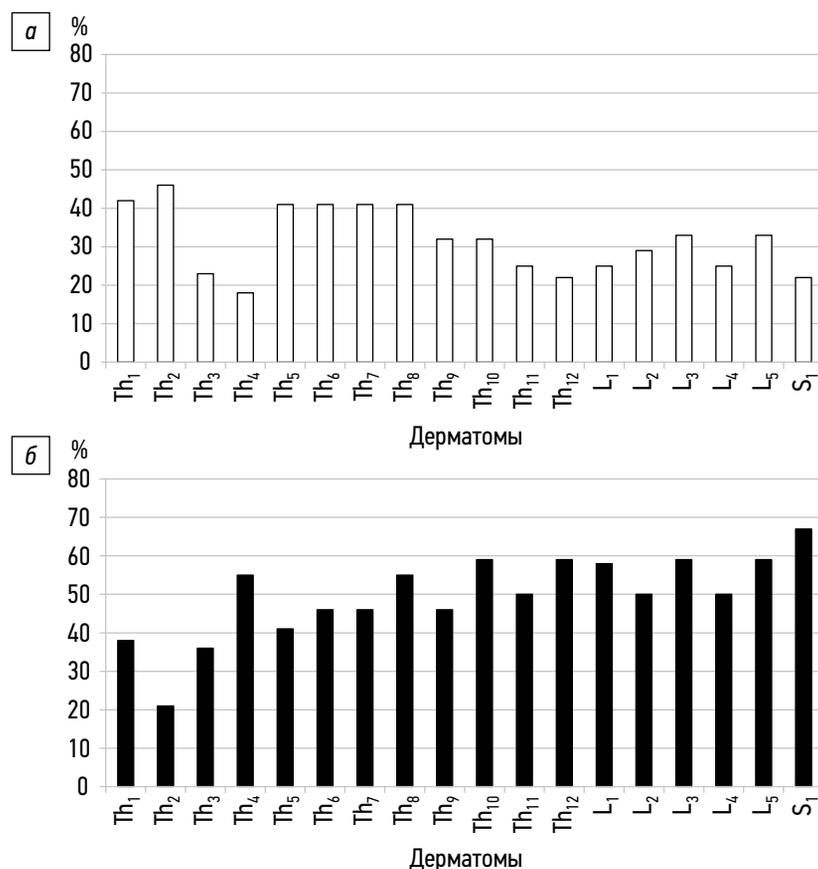


Рис. 3. Положительная (а) и отрицательная (б) динамика болевой чувствительности у подростков с идиопатическим сколиозом через $12,0 \pm 1,2$ дня после оперативной коррекции деформации позвоночника

с $48,5 \pm 3,7$ до $39,0 \pm 2,3$ %, $p = 0,008$) порогов. Наблюдалось увеличение количества термоанестезий (на $52,1$ %, с $35,5 \pm 2,1$ до $54,0 \pm 3,1$ %, $p = 0,000002$). Только в трех дерматомах — Th₁, Th₃, Th₇ — превалировало улучшение тепловой чувствительности. В остальных дерматомах доминировала отрицательная динамика показателей (рис. 2). Особенно это было выражено в дерматомах Th₉–L₁ (зона основной и компенсаторных дуг деформации и оперативного вмешательства). Преобладание отрицательной динамики подтверждается и увеличением порога тепловой чувствительности в среднем по выборке на $1,1 \pm 0,1$ ° (с $39,2 \pm 0,4$ до $40,3 \pm 0,4$ °, $p = 0,0001$).

При оценке изменений болевой чувствительности в среднем по выборке выявлено уменьшение количества случаев нормальных порогов (на $34,5$ %, с $29,0 \pm 3,3$ до $19,0 \pm 3,1$ %, $p = 0,001$) и увеличение количества случаев повышенных порогов (на $16,7$ %, с $63,0 \pm 4,9$ до $73,5 \pm 5,6$ %, $p = 0,0004$). Объем сниженных порогов не изменялся (до лечения — $8,4 \pm 2,4$ %, после лечения — $5,9 \pm 2,2$ %, $p = 0,13$).

В дерматомах Th₁, Th₂ преобладала положительная динамика болевой чувствительности, в дерматоме Th₅ положительная и отрицательная динамика были в одинаковых долях (рис. 3). В остальных дерматомах превалировала отрицательная динамика показателей (в 43–67 % случаев). Было также зарегистрировано повышение порога болевой

чувствительности в среднем по выборке на $1,0 \pm 0,1$ ° (с $43,7 \pm 0,4$ до $44,5 \pm 0,5$ °, $p = 0,0001$).

Таким образом, в ближайший период после коррекции деформации у подростков с идиопатическим сколиозом динамика амплитуды М-ответов *m. rectus femoris*, *m. flexor digitorum brevis*, *m. gastrocnemius* была невыраженной. Достоверно уменьшилась амплитуда суммарной ЭМГ *m. rectus femoris* и частота *m. gastrocnemius*. Отсутствовали изменения амплитуды суммарной ЭМГ *m. tibialis anterior*, *m. gastrocnemius*, частоты суммарной ЭМГ *m. rectus femoris*, *m. tibialis anterior*, амплитуды Н-рефлексов.

В большинстве исследуемых дерматомах обнаружены негативные изменения температурно-болевой чувствительности на субклиническом уровне, изменения неврологического статуса отсутствовали.

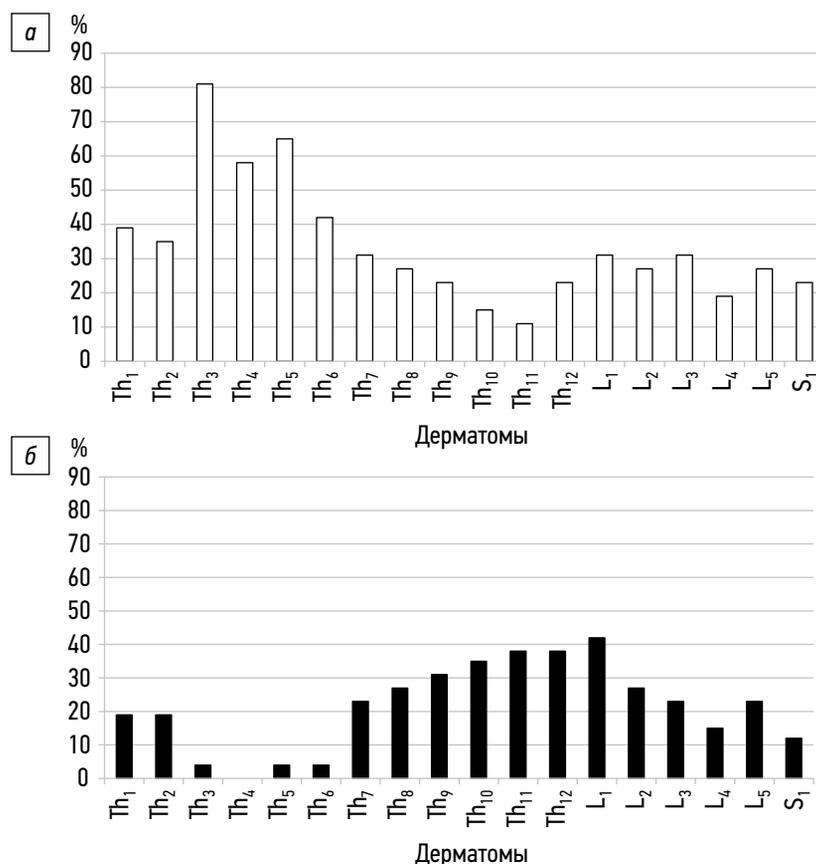
У подростков с врожденными деформациями позвоночника, так же как и с идиопатическим сколиозом, при анализе динамики нейромышечного аппарата после коррекции деформации наблюдалось снижение амплитуды суммарной ЭМГ *m. rectus femoris* (на 21 %, $p = 0,0046$) (табл. 5) и увеличение М-ответов *m. flexor digitorum brevis* (на $11,5$ %, $p = 0,0033$), *m. gastrocnemius* (на $19,2$ %, $p = 0,016$), хотя эти изменения были более выражены, чем при идиопатическом сколиозе.

Отсутствовали достоверные изменения других показателей. Амплитуда Н-рефлексов *m. gastrocnemius*

Таблица 5. Показатели амплитуды М-ответов и суммарной электромиографии мышц нижних конечностей у подростков с врожденными деформациями до и после коррекции деформации ($M \pm m$)

Мышцы	Амплитуда М-ответов, мВ			Показатели суммарной электромиографии			
	контрольная группа	до коррекции	после коррекции	до коррекции		после коррекции	
				амплитуда, мВ	частота, турн/с	амплитуда, мВ	частота, турн/с
<i>M. rectus femoris</i>	21,7 ± 0,7 <i>n</i> = 32	19,5 ± 0,9 <i>2n</i> = 24	18,1 ± 0,7 <i>2n</i> = 24 <i>p</i> = 0,61	0,377 ± 0,04 <i>2n</i> = 24	377,9 ± 20,1 <i>2n</i> = 14	0,299 ± 0,03* <i>2n</i> = 24 <i>p</i> = 0,0046	348,2 ± 16,3 <i>2n</i> = 14 <i>p</i> = 0,077
<i>M. tibialis anterior</i>	7,7 ± 0,3 <i>n</i> = 32	8,8 ± 0,4 <i>2n</i> = 24	9,4 ± 0,6 <i>2n</i> = 24 <i>p</i> = 0,117	0,440 ± 0,04 <i>2n</i> = 24	413,0 ± 46,1 <i>2n</i> = 14	0,418 ± 0,04 <i>2n</i> = 24 <i>p</i> = 0,076	414,3 ± 45,2 <i>2n</i> = 14 <i>p</i> = 0,49
<i>M. extensor digitorum brevis</i>	10,6 ± 0,7 <i>n</i> = 32	7,5 ± 0,8 <i>n</i> = 22	7,5 ± 1,0 <i>n</i> = 22	–	–	–	–
<i>M. flexor digitorum brevis</i>	17,0 ± 1,1 <i>n</i> = 32	17,4 ± 2,1 <i>2n</i> = 22	19,4 ± 2,1* <i>2n</i> = 22 <i>p</i> = 0,0033	–	–	–	–
<i>M. gastrocnemius</i>	31,5 ± 1,2 <i>n</i> = 32	24,0 ± 2,5 <i>2n</i> = 24	28,6 ± 2,0* <i>2n</i> = 24 <i>p</i> = 0,016	0,273 ± 0,03 <i>n</i> = 22	359,0 ± 40,2 <i>2n</i> = 14	0,250 ± 0,04 <i>2n</i> = 22 <i>p</i> = 0,226	310,0 ± 40,1 <i>2n</i> = 14 <i>p</i> = 0,104

* достоверность отличия показателей от уровня нормы, $p < 0,05$. Турн — изменение направления кривой электромиографии с амплитудой кривой не менее 100 мкВ.

**Рис. 4.** Доля (в %) позитивных (а) и негативных (б) изменений тепловой чувствительности подростков с врожденными деформациями позвоночника через $10,0 \pm 0,7$ дня после оперативной коррекции деформации позвоночника

достоверно не отличалась до и после коррекции деформации — $6,3 \pm 0,8$ и $6,4 \pm 0,9$ мВ соответственно. При оценке изменений температурно-болевого чувствительности выявлено увеличение количества случаев нормальных порогов тепловой чувствительности на 96 % (с $6,8 \pm 3,0$ до $13,3 \pm 3,6$ %, $p = 0,001$).

Объем повышенных порогов тепловой чувствительности остался на дооперационном уровне (до операции — $38,3 \pm 3,3$ %, после операции — $35,2 \pm 1,7$ %, $p = 0,177$), так же как и доля термоанестезий: до операции она составляла $55,0 \pm 3,0$ %, после операции — $50,6 \pm 3,6$ % ($p = 0,14$). В среднем по выборке величина порога тепловой чувствительности достоверно не изменилась: до лечения она составляла $40,9 \pm 0,6^\circ$, после лечения — $40,4 \pm 0,6^\circ$ ($p = 0,55$).

Динамика положительных и отрицательных изменений тепловой чувствительности в различных дерматомах может регистрироваться в противофазе (рис. 4). Так, в дерматомах Th₁–Th₇ доминировала положительная динамика (рис. 4, а). Отрицательная динамика была представлена минимально (рис. 4, б). В дерматоме Th₈ наблюдался паритет отрицательной и положительной динамики. С уровня Th₉ по L₁ преобладала отрицательная динамика тепловой чувствительности (зона основной и компенсаторных дуг деформации и оперативного вмешательства). В дерматоме L₂ и S₂ зафиксированы одинаковые значения разно-

направленных изменений. В L₃, L₄, L₅, S₁ превалировала положительная динамика.

Характерной особенностью изменений болевого чувствительности в послеоперационный период было увеличение доли дерматов с гиперестезией — в 3,6 раза (с $3,3 \pm 1,6$ до $15,3 \pm 3,3$ %, $p = 0,0002$). На 42 % уменьшилось количество случаев нормальных порогов (с $18,2 \pm 4,3$ до $10,5 \pm 2,8$ %, $p = 0,013$). Снижение доли дерматов с повышенными порогоми было минимально (на 6 %, с $78,2 \pm 6,0$ до $73,6 \pm 5,4$ %, $p = 0,012$). В области дерматов с Th₆ по S₂ отмечена преимущественно положительная динамика болевого чувствительности (рис. 5). Увеличение доли дерматов со сниженными порогоми, по всей видимости, и определило в среднем по выборке снижение порога болевого чувствительности на $1,1 \pm 0,09^\circ$ (от $46,0 \pm 0,5$ до $44,9 \pm 0,5^\circ$, $p = 0,0000000022$).

Таким образом, в ближайший период после оперативной коррекции деформации у подростков с врожденными деформациями позвоночника зарегистрировано снижение амплитуды суммарной ЭМГ *m. rectus femoris* и увеличение М-ответов *m. flexor digitorum brevis*, *m. gastrocnemius*. Отсутствовали достоверные изменения других активационных показателей мышц. В большинстве исследуемых дерматомах наблюдалась преимущественно положительная динамика показателей температурно-болевого чувствительности.

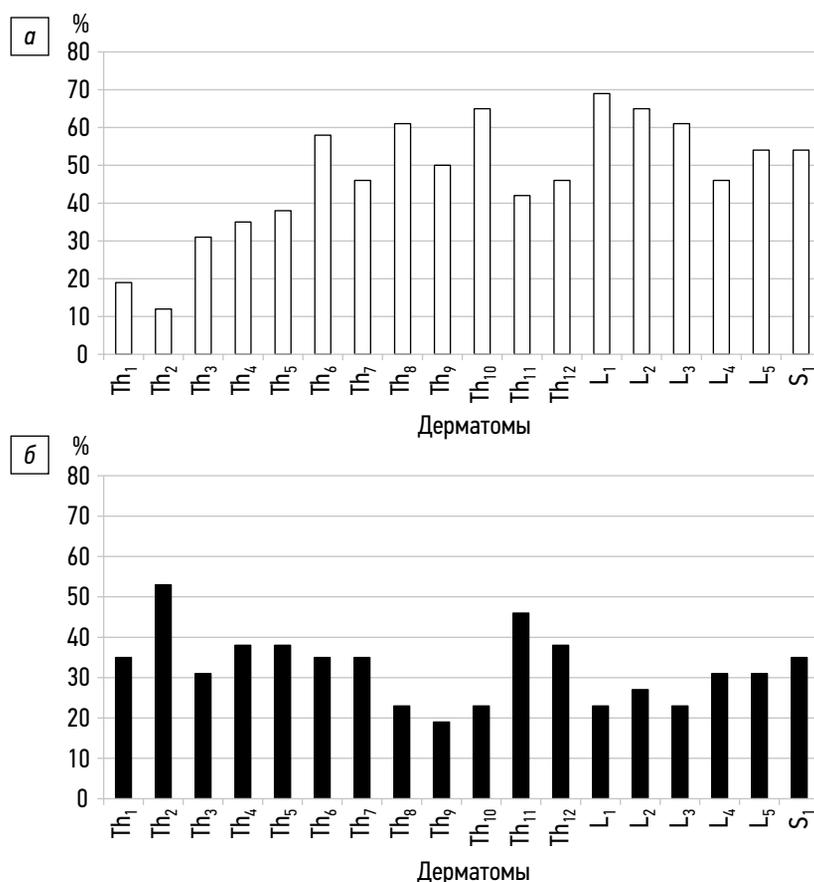


Рис. 5. Положительная (а) и отрицательная (б) динамика (в %) болевого чувствительности подростков с врожденными деформациями позвоночника через $10,0 \pm 0,7$ дня после оперативной коррекции деформации позвоночника

Можно сделать вывод, что у подростков с идиопатическим сколиозом и врожденными деформациями позвоночника в ближайший период после оперативной коррекции деформации происходили аналогичные изменения активационных характеристик мышц, больше выраженные при врожденном сколиозе.

Однако изменения, выявленные в сенсорной сфере температурно-болевого чувствительности в этих двух группах подростков, носили противоположный характер: 1) при идиопатическом сколиозе преобладала отрицательная динамика показателей; 2) при врожденной деформации позвоночника — положительная динамика. Показатели температурно-болевого чувствительности изменялись на субклиническом уровне, ввиду того что динамика неврологического статуса подростков отсутствовала. Однако отсроченные послеоперационные негативные реакции чувствительной сферы могут быть предпосылками возможных неврологических нарушений.

ОБСУЖДЕНИЕ

При анализе различных литературных источников обнаружено небольшое количество объективных инструментальных исследований сенсомоторной системы подростков с идиопатическим сколиозом после оперативной коррекции деформации позвоночника [19, 20, 25]. Были исследованы функциональные возможности пирамидных структур спинного мозга [20], различные характеристики произвольной и вызванной биоэлектрической активности мышц нижних конечностей [19, 20], особенности изменений показателей ЭМГ параспинальных мышц [19, 26] и температурно-болевого чувствительности [21].

В нашей работе оценка реакций нейромышечного аппарата на коррекцию деформации позвоночника показала увеличение амплитуды М-ответов *m. rectus femoris*, *m. flexor digitorum brevis*, *m. gastrocnemius*.

Результаты нашего исследования подтверждаются выводами других авторов, которые определили, что после коррекции деформации позвоночника в 37,8 % случаев улучшаются функциональные возможности сенсомоторного аппарата нижних конечностей [20], увеличивается скорость проведения по моторным аксонам [19]. Было также зафиксировано улучшение функциональных возможностей мышц спины, показатели ЭМГ становились более сбалансированными [19, 26].

В случаях снижения амплитудных характеристик электрической активности мышц, которые сопровождалась или не сопровождалась моторными нарушениями, возникает необходимость повышенного внимания к таким пациентам со стороны невролога не только в послеоперационном периоде, но и перед очередным этапом оперативного лечения [24].

В результате анализа порогов температурно-болевого чувствительности более выраженная негативная реакция отмечена на субклиническом уровне по сравнению

с двигательным компонентом. Данный факт может быть обусловлен особенностями оперативной коррекции (транспедикулярная фиксация), локализации оперативного вмешательства (дорсальный доступ) и расположения сенсорных проводников и ганглиев, величиной коррекции деформации позвоночника.

Задняя инструментальная транспедикулярная фиксация обладает рядом преимуществ: фиксация меньшего количества позвонков, возможность селективной коррекции [27] и адекватного исправления деформации [28]. Однако она имеет недостаток — осуществление только одномоментного исправления [29]. Все маневры сводятся к одномоментным травматичным для спинного мозга дистракционным манипуляциям [29, 30].

Негативные изменения температурно-болевого чувствительности могут быть обусловлены одномоментной интраоперационной тракцией позвоночника (деротационным маневром), когда опосредованное воздействие на спинной мозг и реактивные изменения сосудов (микрососудистые ишемические события) могут нарушать функции спинного мозга и его структур [31].

Улучшение показателей этого вида чувствительности может быть связано с тем, что после коррекции деформации позвоночника исходно напряженные и сдавленные поверхностные оболочечные артерии и некоторые корешковые артерии оказываются в более оптимальных условиях, а это приводит к улучшению трофики и функционирования невральных структур.

Анализ литературы показал, что в научных публикациях отсутствуют сведения об инструментальных исследованиях реакций чувствительной и двигательной сфер у подростков с врожденными деформациями позвоночника.

В нашей работе было определено, что у пациентов с врожденными деформациями позвоночника изменения нейромышечного аппарата после коррекции деформации были почти такие же, как и у пациентов с идиопатической деформацией, хотя величина сдвигов была больше.

Изменения, наблюдавшиеся при исследовании температурно-болевого чувствительности у подростков с врожденной деформацией, носили преимущественно позитивный характер в отличие от негативной динамики этого вида чувствительности при идиопатическом сколиозе. Следует учесть, что при отсутствии достоверных отличий исходного угла основной дуги деформации в этих группах подростков ($p = 0,131$) показатель величины коррекции деформации (%) в группе обследуемых с идиопатическим сколиозом был больше на 48 % ($p = 0,0004$). Коррекция компенсаторной дуги при идиопатическом сколиозе также была больше (на 51 %, $p = 0,011$), чем при врожденной деформации.

Сниженный темп коррекции деформации при врожденной патологии может быть обусловлен повышенной долей случаев критических изменений МВП, выявляемых в ходе интраоперационного мониторинга, что сигнализирует об опасных изменениях функционального состояния спинного мозга.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При исследовании реакций сенсомоторной системы подростков с идиопатическим сколиозом и врожденными деформациями позвоночника в ближайший период после оперативного лечения выявлено увеличение амплитуды М-ответов *m. rectus femoris*, *m. flexor digitorum brevis*, *m. gastrocnemius*, снижение амплитуды суммарной ЭМГ *m. rectus femoris*. Показатели Н-рефлексов оставались на дооперационном уровне.

Реакции чувствительной сферы (температурно-болевой чувствительности) были более выражены, чем двигательного компонента, хотя и на субклиническом уровне. Изменения в группах подростков с идиопатическим сколиозом и врожденными деформациями позвоночника носили противоположный характер: при идиопатическом сколиозе преобладала отрицательная динамика показателей, при врожденных деформациях улучшалась температурно-болевая чувствительность. Данный факт можно объяснить тем, что при отсутствии достоверных отличий исходного угла основной дуги деформации величина коррекции деформации в группе обследуемых с идиопатическим сколиозом была больше на 48 %. Коррекция компенсаторной дуги при идиопатическом сколиозе также была больше на 51 %, чем при врожденных деформациях.

Уменьшенный объем коррекции деформации при врожденных деформациях может быть обусловлен повышенной долей случаев с критическим снижением амплитуды МВП в процессе интраоперационного мониторинга.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hong J.Y., Suh S.W., Lee S.H. et al. Continuous distraction-induced delayed spinal cord injury on motor-evoked potentials and histological changes of spinal cord in a porcine model // *Spinal Cord*. 2016. Vol. 54. No. 9. P. 649–655. DOI: 10.1038/sc.2015.231
2. Bell J.E.S., Seifert J.L., Shimizu E.N. et al. Atraumatic spine distraction induces metabolic distress in spinal motor Neurons // *J. Neurotrauma*. 2017. Vol. 34. No. 12. P. 2034–2044. DOI: 10.1089/neu.2016.4779
3. Bartley C.E., Yaszay B., Bastrom T.P. et al. Perioperative and delayed major complications following surgical treatment of adolescent idiopathic scoliosis // *J. Bone Joint Surg. Am.* 2017. Vol. 99. No. 14. P. 1206–1212. DOI: 10.2106/JBJS.16.01331
4. Cotrel Y., Dubousset J. A new technic for segmental spinal osteosynthesis using the posterior approach // *Orthop. Traumatol. Surg. Res.* 2014. Vol. 100. P. 37–41. DOI: 10.1016/j.otsr.2013.12.009
5. Formby P.M., Wagner S.C., Kang D.G. et al. Reoperation after in-theater combat spine surgery // *Spine J.* 2016. Vol. 16. P. 329–334. DOI: 10.1016/j.spinee.2015.11.027
6. MacEwen G.D., Bunnell W.P., Sriram K. Acute neurological complications in the treatment of scoliosis. A report of the Scoliosis Research Society // *J. Bone Joint Surg. Am.* 1975. Vol. 57. P. 404–408.
7. Cotrel Y., Dubousset J., Guillaumat M. New universal instrumentation in spinal surgery // *Clin. Orthop. Relat. Res.* 1988. Vol. 227. P. 10–23.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Источник финансирования. Исследование выполнено без использования спонсорских средств.

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

Этическая экспертиза. Тематика исследования одобрена на заседании этического комитета ФГБУ «Национальный медицинский исследовательский центр травматологии и ортопедии имени академика Г.А. Илизарова» Министерства здравоохранения Российской Федерации» (г. Курган) от 13.11.2018 № 4 (59). Данная работа выполнена в соответствии с этическими стандартами, изложенными в Хельсинкской декларации с последующими изменениями. Всеми пациентами или их законными представителями (в случае, если в работе описаны данные исследований с участием несовершеннолетних) было подписано информированное согласие на публикацию данных, полученных в результате исследований, без идентификации личности.

Вклад авторов. *Е.Н. Щурова* — концепция и дизайн исследования, написание текста статьи, редактирование текста статьи. *М.С. Сайфутдинов* — концепция и дизайн исследования, статистическая обработка материала, написание текста статьи, редактирование текста статьи. *М.А. Ахмедова* — сбор и обработка материала, статистическая обработка. *Д.М. Савин* — сбор и обработка материала, редактирование текста статьи. *М.А. Богатырев* — обработка данных, анализ архивного материала.

Все авторы внесли существенный вклад в проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией.

8. Sansur C.A., Smith J.S., Coe J.D. et al. Scoliosis research society morbidity and mortality of adult scoliosis surgery // *Spine*. 2011. Vol. 36. P. E593. DOI: 10.1097/BRS.0b013e3182059bfd
9. Lopez A.J., Scheer J.K., Smith Z.A. et al. Management of flexion distraction injuries to the thoracolumbar spine // *J. Clin. Neurosci.* 2015. Vol. 22. P. 1853–1856. DOI: 10.1016/j.jocn.2015.03.062
10. Lavelle W.F., Beltran A.A., Carl A.L. et al. Fifteen to twenty-five year functional outcomes of twenty-two patients treated with posterior Cotrel-Dubousset type instrumentation: a limited but detailed review of outcomes // *Scoliosis Spinal. Disord.* 2016. Vol. 11. P. 18. DOI: 10.1186/s13013-016-0079-6
11. Schwartz D.M., Auerbach J.D., Dormans J.P. et al. Neurophysiological detection of impending spinal cord injury during scoliosis surgery // *J. Bone Joint Surg. Am.* 2007. Vol. 89. P. 11. P. 2440–2449. DOI: 10.2106/JBJS.F.01476
12. Pahys J.M., Guille J.T., D'Andrea L.P. et al. Neurologic injury in the surgical treatment of idiopathic scoliosis: guidelines for assessment and management // *J. Am. Acad. Orthop. Surg.* 2009. Vol. 17. P. 426–434. DOI: 10.5435/00124635-200907000-00003
13. Wu J., Xue J., Huang R. et al. Rabbit model of lumbar distraction spinal cord injury // *Spine J.* 2016. Vol. 16. P. 643–658. DOI: 10.1016/j.spinee.2015.12.013
14. Iwahara T. The influence of spine distraction on cat spinal cord blood flow and evoked potentials // *Ni-hon Seikeigeka Gakkai Zasshi*. 1991. Vol. 65. No. 1. P. 44–55.

15. Миронов С.П., Ветрилэ С.Т., Нацвлишвили З.Г. и др. Оценка особенностей спинального кровообращения, микроциркуляции в оболочках спинного мозга и нейровегетативной регуляции при сколиозе // *Хирургия позвоночника*. 2006. № 3. С. 38–48.
16. Cusick J.F., Myklebust J., Zyvoloski M. et al. Effects of vertebral column distraction in the monkey // *J. Neurosurg.* 1982. Vol. 57. No. 5. P. 651–659. DOI: 10.3171/jns.1982.57.5.0651
17. Auerbach J.D., Kean K., Milby A.H., et al. Delayed postoperative neurologic deficits in spinal deformity surgery // *Spine*. 2016. Vol. 41. No. 3. P. E131–138. DOI: 10.1097/BRS.0000000000001194
18. Qiao J., Xiao L., Zhu Z. et al. Delayed postoperative neurologic deficit after spine deformity surgery: analysis of 5377 cases at 1 institution // *World Neurosurg.* 2018. Vol. 111. P. e160–e164. DOI: 10.1016/j.wneu.2017.12.010
19. Ломага И.А., Мальмберг С.А., Тарасов Н.И., Петрухин А.С. Неврологические синдромы при идиопатических прогрессирующих сколиозах у детей // *Российский журнал детской неврологии*. 2008. Т. III. № 3. С. 12–19.
20. Шейн А.П., Криворучко Г.А., Рябых С.О. Реактивность и резистентность спинномозговых структур при выполнении инструментальной коррекции деформаций позвоночника // *Российский физиологический журнал им. И.М. Сеченова*. 2016. Т. 102. № 12. С. 1495–1506.
21. Щурова Е.Н., Прудникова О.Г., Рябых С.О., Липин С.А. Сравнительный анализ динамики температурно-болевого чувствительности после коррекции тяжелых и нетяжелых деформаций позвоночника у больных с идиопатическим сколиозом // *Гений ортопедии*. 2018. Т. 24. № 3. С. 365–374. DOI: 10.18019/1028-4427-2018-24-3-365-374
22. Шейн А.П., Сайфутдинов М.С., Криворучко Г.А. Локальные и системные реакции сенсомоторных структур на удлинение и ишемию конечностей. Курган: ДАММИ, 2006.
23. Сайфутдинов М.С., Рябых С.О., Савин Д.М., Третьякова А.Н. Формализация результатов интраоперационного нейрофизиологического контроля моторных путей спинного мозга при хирургической коррекции деформаций позвоночника // *Вестник хирургии имени И.И. Грекова*. 2018. Т. 177. № 11. С. 49–53. DOI: 10.24884/0042-4625-2018-177-1-49-53
24. Сайфутдинов М.С., Рябых С.О., Савин Д.М., Третьякова А.Н. Количественная характеристика риска ятрогенных поврежденных пирамидных путей по данным интраоперационного нейромониторинга при хирургической коррекции деформаций позвоночника // *Вопросы нейрохирургии*. 2019. № 4. С. 56–63. DOI: 10.17116/невро20198304156
25. Никитюк И.Е., Виссарионов С.В. Особенности опорной функции стоп у детей с тяжелыми формами идиопатического сколиоза до и после хирургического лечения // *Гений ортопедии*. 2021. Т. 27. № 6. С. 758–766. DOI: 10.18019/1028-4427-2021-27-6-758-766
26. Lu W.W., Hu Y., Luk K.D. et al. Paraspinal muscle activities of patients with scoliosis after spine fusion: an electromyographic study // *Spine*. 2002. Vol. 27. No. 11. P. 1180–1185. DOI: 10.1097/00007632-200206010-00009
27. Suk S.I., Kim W.J., Lee S.M. et al. Thoracic pedicle screw fixation in spinal deformities: Are they really safe? // *Spine*. 2001. Vol. 26. No. 18. P. 2049–2057. DOI: 10.1097/00007632-200109150-00022
28. Rose P.S., Lenke L.G., Bridwell K.H. et al. Pedicle screw instrumentation for adult idiopathic scoliosis: an improvement over hook/hybrid fixation // *Spine*. 2009. Vol. 34. No. 8. P. 852–857. DOI: 10.1097/BRS.0b013e31818e5962
29. Diab M., Smith A.R., Kuklo T.R. Neural complications in the surgical treatment of adolescent idiopathic scoliosis // *Spine*. 2007. Vol. 32. No. 24. P. 2759–2763. DOI: 10.1097/BRS.0b013e31815a5970
30. Guidera K.J., Hooten J., Weatherly W. et al. Cotrel-Dubousset instrumentation. Results in 52 patients // *Spine*. 1993. Vol. 18. No. 4. P. 427–431.
31. Awwad W., Bassi M., Shrier I. et al. Mitigating spinal cord distraction injuries: the effect of durotomy in decreasing cord interstitial pressure in vitro // *Eur. J. Orthop. Surg. Traumatol.* 2014. Vol. 24. Suppl. 1. P. S261–S267. DOI: 10.1007/s00590-013-1409-5

REFERENCES

1. Hong JY, Suh SW, Lee SH, et al. Continuous distraction-induced delayed spinal cord injury on motor-evoked potentials and histological changes of spinal cord in a porcine model. *Spinal Cord*. 2016;54(9):649–655. DOI: 10.1038/sc.2015.231
2. Bell JES, Seifert JL, Shimizu EN, et al. Atraumatic spine distraction induces metabolic distress in spinal motor Neurons. *J Neurotrauma*. 2017;34(12):2034–2044. DOI: 10.1089/neu.2016.4779
3. Bartley CE, Yaszay B, Bastrom TP, et al. Perioperative and delayed major complications following surgical treatment of adolescent idiopathic scoliosis. *J Bone Joint Surg Am*. 2017;99(14):1206–1212. DOI: 10.2106/JBJS.16.01331
4. Cotrel Y, Dubousset J. A new technic for segmental spinal osteosynthesis using the posterior approach. *Orthop Traumatol Surg Res*. 2014;100:37–41. DOI: 10.1016/j.otsr.2013.12.009
5. Formby PM, Wagner SC, Kang DG, et al. Reoperation after in-theater combat spine surgery. *Spine J*. 2016;16:329–334. DOI: 10.1016/j.spinee.2015.11.027
6. MacEwen GD, Bunnell WP, Sriram K. Acute neurological complications in the treatment of scoliosis. A report of the Scoliosis Research Society. *J Bone Joint Surg Am*. 1975;57:404–408.
7. Cotrel Y, Dubousset J, Guillaumat M. New universal instrumentation in spinal surgery. *Clin Orthop Relat Res*. 1988;227:10–23.
8. Sansur CA, Smith JS, Coe JD, et al. Scoliosis research society morbidity and mortality of adult scoliosis surgery. *Spine*. 2011;36:E593. DOI: 10.1097/BRS.0b013e3182059bfd
9. Lopez AJ, Scheer JK, Smith ZA, et al. Management of flexion distraction injuries to the thoracolumbar spine. *J Clin Neurosci*. 2015;22:1853–1856. DOI: 10.1016/j.jocn.2015.03.062
10. Lavelle WF, Beltran AA, Carl AL, et al. Fifteen to twenty-five year functional outcomes of twenty-two patients treated with posterior Cotrel-Dubousset type instrumentation: a limited but detailed review of outcomes. *Scoliosis Spinal Disord*. 2016;11:18. DOI: 10.1186/s13013-016-0079-6
11. Schwartz DM, Auerbach JD, Dormans JP, et al. Neurophysiological detection of impending spinal cord injury during scoliosis surgery. *J Bone Joint Surg Am*. 2007;89(11):2440–2449. DOI: 10.2106/JBJS.F.01476
12. Pahys JM, Guille JT, D'Andrea LP, et al. Neurologic injury in the surgical treatment of idiopathic scoliosis: guidelines for assessment and management. *J Am Acad Orthop Surg*. 2009;17:426–434. DOI: 10.5435/00124635-200907000-00003

13. Wu J, Xue J, Huang R, et al. Rabbit model of lumbar distraction spinal cord injury. *Spine J*. 2016;16:643–658. DOI: 10.1016/j.spinee.2015.12.013
14. Iwahara T. The influence of spine distraction on cat spinal cord blood flow and evoked potentials. *Ni-hon Seikeigeka Gakkai Zasshi*. 1991;65(1):44–55.
15. Mironov SP, Vetrile ST, Natsvlshvili ZG, et al. Evaluation of the features of spinal blood circulation, microcirculation in the spinal cord tunics and neurovegetative regulation in scoliosis. *Khirurgiia Pozvonochnika*. 2006;3:38–48. (In Russ.)
16. Cusick JF, Myklebust J, Zyvoloski M, et al. Effects of vertebral column distraction in the monkey. *J Neurosurg*. 1982;57(5):651–659. DOI: 10.3171/jns.1982.57.5.0651
17. Auerbach JD, Kean K, Milby AH, et al. Delayed postoperative neurologic deficits in spinal deformity surgery. *Spine*. 2016;41(3):E131–138. DOI: 10.1097/BRS.0000000000001194
18. Qiao J, Xiao L, Zhu Z, et al. Delayed postoperative neurologic deficit after spine deformity surgery: analysis of 5377 cases at 1 institution. *World Neurosurg*. 2018;111:e160–e164. DOI: 10.1016/j.wneu.2017.12.010
19. Lomaga IA, Malmberg SA, Tarasov NI, Petrukhin AS. Neurological syndromes for idiopathic progressing scolioses in children. *Russkii Zhurnal Detskoi Nevrologii*. 2008;3(3):12–19. (In Russ.)
20. Shein AP, Krivoruchko GA, Riabykh SO. Reactivity and resistance of cerebrospinal structures when performing instrumental correction of the spine deformities. *Rossiiskii Fiziologicheskii Zhurnal im. IM Sechenova*. 2016;102(12):1495–1504. (In Russ.)
21. Shchurova EN, Prudnikova OG, Ryabykh SO, Lipin SA. Comparative analysis of dynamics in thermal pain sensitivity after correction of severe and mild spine deformities in patients with idiopathic scoliosis. *Genij Ortopedii*. 2018;24(3):365–374. (In Russ.). DOI: 10.18019/1028-4427-2018-24-3-365-374
22. Shein AP, Saifutdinov MS, Krivoruchko GA. Local and systemic responses of sensorimotor structures to limb elongation and ischemia. *Kurgan: DAMMI*; 2006. (In Russ.)
23. Saifutdinov MS, Ryabykh SO, Savin DM, Tretyakova AN. Formalizing the results of intraoperative neurophysiological monitoring of the motor pathways into the spinal cord during the surgical correction of spinal deformities. *Grekov's Bulletin of Surgery*. 2018;177(1):49–53. (In Russ.). DOI: 10.24884/0042-4625-2018-177-1-49-53
24. Saifutdinov MS, Ryabykh SO, Savin DM, Tretyakova AN. Quantitative characteristics of the risk of iatrogenic damage to the pyramidal tracts according to intraoperative neuromonitoring during surgical correction of spinal deformities. *Voprosy neyrokirurgii*. 2019;4:56–63. (In Russ.). DOI: 10.17116/neiro20198304156
25. Nikiyuk IE, Vissarionov SV. Supporting function of the feet in children with severe forms of idiopathic scoliosis before and after surgical treatment. *Genij Ortopedii*. 2021;27(6):758–766. (In Russ.). DOI: 10.18019/1028-4427-2021-27-6-758-766
26. Lu WW, Hu Y, Luk KD, et al. Paraspinal muscle activities of patients with scoliosis after spine fusion: an electromyographic study. *Spine*. 2002;27(11):1180–1185. DOI: 10.1097/00007632-200206010-00009
27. Suk SI, Kim WJ, Lee SM, et al. Thoracic pedicle screw fixation in spinal deformities: Are they really safe? *Spine*. 2001;26(18):2049–2057. DOI: 10.1097/00007632-200109150-00022
28. Rose PS, Lenke LG, Bridwell KH, et al. Pedicle screw instrumentation for adult idiopathic scoliosis: an improvement over hook/hybrid fixation. *Spine*. 2009;34(8):852–857. DOI: 10.1097/BRS.0b013e31818e5962
29. Diab M, Smith AR, Kuklo TR. Neural complications in the surgical treatment of adolescent idiopathic scoliosis. *Spine*. 2007;32(24):2759–2763. DOI: 10.1097/BRS.0b013e31815a5970
30. Guidera KJ, Hooten J, Weatherly W, et al. Cotrel-Dubousset instrumentation. Results in 52 patients. *Spine*. 1993;18 (4): 427–431
31. Awwad W, Bassi M, Shrier I, et al. Mitigating spinal cord distraction injuries: the effect of durotomy in decreasing cord interstitial pressure *in vitro*. *Eur J Orthop Surg Traumatol*. 2014;24(Suppl 1):S261–S267. DOI: 10.1007/s00590-013-1409-5

ОБ АВТОРАХ

* **Елена Николаевна Щурова**, д-р биол. наук;
адрес: Россия, 640014, Курган, ул. М. Ульяновой, д. 6;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0816-1004>,
Scopus Author ID: 6602428322;
ResearcherId: B-6692-2018;
eLibrary SPIN: 6919-1265;
e-mail: elena.shurova@mail.ru

Марат Саматович Сайфутдинов, д-р биол. наук;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7477-5250>;
ResearcherId: U-4948-2018;
eLibrary SPIN: 2811-2992;
e-mail: maratsaif@yandex.ru

AUTHOR INFORMATION

* **Elena N. Shchurova**, Dr. Sci. (Biol.);
address: 6 M. Ulyanovoy str., Kurgan, 640014, Russia;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0816-1004>,
Scopus Author ID: 6602428322;
ResearcherId: B-6692-2018;
eLibrary SPIN: 6919-1265;
e-mail: elena.shurova@mail.ru

Marat S. Saifutdinov, Dr. Sci. (Biol.);
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7477-5250>;
ResearcherId: U-4948-2018;
eLibrary SPIN: 2811-2992;
e-mail: maratsaif@yandex.ru

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

ОБ АВТОРАХ

Мехрибан Ахмедовна Ахмедова, аспирант;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5486-6422>;
e-mail: marina.ahmedova.90@mail.ru

Дмитрий Михайлович Савин, канд. мед. наук;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6284-2850>;
eLibrary SPIN: 2155-2581;
e-mail: savindm81@mail.ru

Максим Андреевич Богатырев, аспирант;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4637-2435>;
e-mail: 270419920000dok@gmail.com

AUTHOR INFORMATION

Mekhriban A. Akhmedova, MD, PhD student;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5486-6422>;
e-mail: marina.ahmedova.90@mail.ru

Dmitry M. Savin, MD, PhD, Cand. Sci. (Med.);
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6284-2850>;
eLibrary SPIN: 2155-2581;
e-mail: savindm81@mail.ru

Maksim A. Bogatyrev, MD, PhD student;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4637-2435>;
e-mail: 270419920000dok@gmail.com