

# ИНТРАОПЕРАЦИОННЫЙ НЕЙРОФИЗИОЛОГИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ ПРИ ХИРУРГИЧЕСКОЙ КОРРЕКЦИИ СКОЛИОЗА ДЛЯ ПОСЛЕОПЕРАЦИОННОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ МОТОРНОЙ ФУНКЦИИ ПАЦИЕНТА

DOI: 10.17691/stm2021.13.5.07  
УДК 616.711–007.55–089–085.825  
Поступила 11.04.2021 г.

© Ю.С. Арестова, специалист клиники патологии позвоночника и редких заболеваний;  
М.С. Сайфутдинов, д.б.н., ведущий научный сотрудник;  
Д.М. Савин, к.м.н., зав. травматолого-ортопедическим отделением №9;  
М.З. Насыров, к.м.н., зав. отделением реабилитации;  
Т.В. Рябык, врач функциональной диагностики;  
С.О. Рябык, д.м.н., зам. директора

Национальный медицинский исследовательский центр травматологии и ортопедии им. академика Г.А. Илизарова Министерства здравоохранения Российской Федерации, ул. М. Ульяновой, 6, Курган, 640014

**Цель исследования** — изучить влияние неблагоприятных интраоперационных событий на субклиническое снижение функционального состояния сенсомоторной системы пациентов со сколиозом и на их раннюю послеоперационную реабилитацию.

**Материалы и методы.** Проведено сравнение результатов обследования 30 подростков 13–16 лет со сколиозом до и после хирургической коррекции. Оперативное вмешательство осуществляли под нейрофизиологическим контролем методом транскраниально-вызванных моторных потенциалов. Пациенты были разделены на 2 группы в зависимости от наличия или отсутствия нейрофизиологических признаков повреждения нервных структур во время операции.

**Результаты.** Амплитуда М-ответов мышц нижних конечностей в послеоперационном периоде остается на уровне, близком к исходному, при заметном снижении амплитуды произвольной электромиографии, которое выражено неравномерно и в большей степени — у пациентов с интраоперационными признаками опасности для моторных путей спинного мозга.

**Заключение.** Неблагоприятные интраоперационные события вызывают существенные изменения состояния моторной системы пациентов со сколиозом и снижают эффективность восстановительного лечения в послеоперационном периоде.

**Ключевые слова:** деформация позвоночника; сколиоз; электромиография; нейромониторинг; моторно-вызванные потенциалы; лечебная физкультура.

**Как цитировать:** Arestova Yu.S., Sayfutdinov M.S., Savin D.M., Nasyrov M.Z., Ryabikh T.V., Ryabikh S.O. Intraoperative neurophysiological monitoring during surgical correction of scoliosis for postoperative recovery of the patient's motor function. *Sovremennye tehnologii v medicine* 2021; 13(5): 55–61, <https://doi.org/10.17691/stm2021.13.5.07>

## English

## Intraoperative Neurophysiological Monitoring during Surgical Correction of Scoliosis for Postoperative Recovery of the Patient's Motor Function

Yu.S. Arestova, Specialist, Clinic for Spine Pathology and Rare Diseases;  
M.S. Sayfutdinov, DSc, Leading Researcher;  
D.M. Savin, MD, PhD, Head of Traumatology and Orthopedics Department No.9;  
M.Z. Nasyrov, MD, PhD, Head of the Department of Rehabilitation;  
T.V. Ryabikh, Doctor of Functional Diagnostics;  
S.O. Ryabikh, MD, DSc, Deputy Director

National Ilizarov Medical Research Center for Traumatology and Orthopedics,  
Ministry of Health of the Russian Federation, 6 M. Ulyanova St., Kurgan, 640014, Russia

**Для контактов:** Сайфутдинов Марат Саматович, e-mail: maratsaif@yandex.ru

**The aim of the investigation** was to study the effect of adverse intraoperative events on the subclinical decrease in the functional state of the sensorimotor system of patients with scoliosis and their early postoperative rehabilitation.

**Materials and Methods.** The results of the examination of 30 adolescents of 13–16 years old with scoliosis before and after surgical correction were compared. Intraoperative neurophysiological monitoring was used by the method of transcranial evoked motor potentials. The patients were divided into two groups depending on the presence or absence of neurophysiological signs of damage to nerve structures during the operation.

**Results.** The amplitude of the M-responses of the muscles of the lower limbs in the postoperative period remains at a level close to the initial one, with a noticeable decrease in the amplitude of voluntary electromyography, which is expressed unevenly and to a greater extent in patients with intraoperative signs of hazard for the motor pathways of the spinal cord.

**Conclusion.** Adverse intraoperative events cause significant changes in the state of the motor system of patients with scoliosis and reduce the effectiveness of rehabilitation treatment in the postoperative period.

**Key words:** spinal deformity; scoliosis; electromyography; neuromonitoring; motor-evoked potentials; physiotherapy.

## Введение

Существующее сейчас хирургическое лечение выраженных деформаций позвоночника является симптоматическим. К нему прибегают, когда консервативные методы воздействия оказываются неэффективными, неспособными справиться с нарастанием проблемы. Для понимания причин возникновения и прогрессивного развития данной группы ортопедических заболеваний проводятся исследования структурно-функционального состояния сенсомоторной системы пациентов с помощью инструментальных методов тестирования [1, 2]. Полученная таким образом информация может быть также использована для оптимизации постоперационной реабилитации и при дальнейшей консервативной терапии [3].

При хирургическом лечении сколиозов существует риск возникновения в послеоперационном периоде нового неврологического дефицита [4, 5]. Для решения данной проблемы сформировался комплекс методов интраоперационного нейрофизиологического контроля функционального состояния спинного мозга, получивший название интраоперационного нейромониторинга [6]. В качестве инструмента тестирования моторной системы в этот комплекс входит метод транскраниально-вызванных моторных потенциалов [7, 8]. Интерес представляют ситуации с критическими изменениями моторно-вызванных потенциалов (МВП) при отсутствии послеоперационных неврологических расстройств. Некоторые авторы интерпретируют эти изменения как ложноположительные реакции пирамидного пути спинного мозга [9], однако единого мнения по этому вопросу не наблюдается [7, 10]. Результаты наших исследований показали, что даже при отсутствии послеоперационного неврологического дефицита неблагоприятные интраоперационные события, сопровождающиеся негативными изменениями МВП, приводят к снижению нейрофизиологических сенсомоторных показателей [11, 12].

**Цель исследования** — изучить влияние неблагоприятных интраоперационных событий на субклиническое снижение функционального состояния сенсо-

моторной системы пациентов со сколиозом и на их раннюю послеоперационную реабилитацию.

## Материалы и методы

В исследование включено 30 подростков (11 — мужского и 19 — женского пола) 13–16 лет (средний возраст —  $14,50 \pm 0,16$  года) со сколиозом разной этиологии: идиопатическим сколиозом ( $n=16$ ); врожденной деформацией позвоночника ( $n=5$ ); деформацией позвоночника, связанной с системными заболеваниями скелета ( $n=3$ ); нейрогенным сколиозом ( $n=6$ ). Локализация деформации: грудопоясничная ( $n=25$ ); грудная ( $n=3$ ); шейно-грудопоясничная ( $n=2$ ). Угол деформации варьировал от 40 до 115°. Параметры физического развития пациентов оценивали с учетом ростовых данных [13].

Моторные (М) ответы мышц нижних конечностей получали при монополярном накожном отведении и супрамаксимальном раздражении соответствующих нервов, электромиограммы — при максимальном произвольном напряжении (накожном биполярном отведении мышц). Рассчитывали предположенный А.П. Шейным цереброспинальный индекс (ЦСИ) [14]. В качестве мышц-индикаторов использовали *m. rectus femoris*, *m. tibialis anterior*, *m. gastrocnemius lateralis*, *m. extensor digitorum brevis*, *m. flexor digitorum brevis* левой и правой нижних конечностей. Исследования проводили перед оперативной коррекцией деформации позвоночника и через две недели после вмешательства. Полученные данные сравнивали с результатами обследования практически здоровых добровольцев [15]. Оперативное вмешательство осуществляли под нейрофизиологическим контролем методом транскраниально-вызванных моторных потенциалов.

Исследуемые были разделены на две группы сравнения: в 1-ю ( $n=20$ ) вошли пациенты со спокойным течением операции, у которых не наблюдалось нейрофизиологических признаков опасных изменений состояния спинного мозга; у пациентов 2-й группы ( $n=10$ ) в процессе операции отмечалось значительное угнетение МВП вплоть до полного их исчезновения, на что указывало существенное снижение функциональ-

ного состояния пирамидной системы спинного мозга. В послеоперационном периоде у данных пациентов клинических признаков неврологических нарушений не выявлено.

Всем исследуемым в послеоперационном периоде назначали комплекс ЛФК с использованием дыхательных и общеукрепляющих физических упражнений.

Исследование проведено в соответствии с этическими стандартами, изложенными в Хельсинкской декларации (2013), и одобрено комитетом по этике Национального медицинского исследовательского центра травматологии и ортопедии им. академика Г.А. Илизарова (Курган). Информированное добровольное согласие получено от всех пациентов старше 15 лет и от родителей пациентов, не достигших 15-летнего возраста, согласно Федеральному закону «Основы законодательства Российской Федерации об охране здоровья граждан» (2011).

**Статистический анализ.** Математическую обработку данных проводили с помощью программного комплекса Microsoft Excel 2010 и интегрированного с ним пакета Attestat, а также пакета программ IBM SPSS Statistics 21.0. Методом Колмогорова–Смирнова оценивали характер статистического распределения анализируемых параметров электромиографии (ЭМГ). Рассчитывали средние значения амплитуды вызванной и произвольной ЭМГ, стандартную ошибку среднего. Данные представлены как  $M \pm m$ . В качестве меры вариативности использовали коэффициент вариации (CV) — выраженное в процентах отношение стандартного отклонения к среднему значению. Значимость различий в группах ввиду нормального характера статистического распределения определяли, используя

t-критерий для независимых и попарно сопряженных выборок с предварительной оценкой условия равенства дисперсий с помощью критерия Левена. Различия считали статистически значимыми при  $p < 0,05$ .

### Результаты

Параметры физического развития с учетом роста пациентов распределились в центильных коридорах SD2neg, SD1neg, SD0, т.е. с превалированием пониженной массы тела у 21 пациента (70%). Пониженная масса тела выявлена у всех пациентов с врожденной (5 — SD1neg), системной (2 — SD2neg, 1 — SD1neg) и нейрогенной (2 — SD2neg, 4 — SD1neg) деформацией позвоночника и у 7 из 16 пациентов с идиопатическим сколиозом (SD1neg).

Результаты нейрофизиологического тестирования функционального состояния моторной системы показали, что средняя амплитуда М-ответа мышц нижних конечностей в группах сравнения статистически значимо не различается ( $p > 0,05$ ). Для 3 из 5 тестируемых мышц она снижена относительно нормы: в 1-й группе — на 6,5–31,2% и во 2-й — на 9,3–27,5%. Для m. extensor digitorum brevis снижение М-ответа в обеих группах статистически значимо ( $p < 0,05$ ) (табл. 1).

Средневыборочные значения параметров ЭМГ при максимальном произвольном напряжении мышц нижних конечностей (табл. 2) в группах сравнения различаются статистически не значимо ( $p > 0,05$ ), за исключением m. rectus femoris, для которой средняя амплитуда в дооперационном периоде статистически значимо выше ( $p < 0,05$ ) у пациентов 2-й группы по сравнению с 1-й. При этом во всех случаях амплитуда

Таблица 1

Средние значения амплитуды М-ответа мышц нижних конечностей ( $M \pm m$ )

Мышца	До операции			После операции			Норма, мВ
	n	Амплитуда М-ответа, мВ	CV, %	n	Амплитуда М-ответа, мВ	CV, %	
<b>1-я группа</b>							
m. rectus femoris	36	19,7±0,6	17,0	34	18,1±0,7	22,0	21,1±0,4
m. tibialis anterior	40	8,3±0,4	30,4	38	9,3±0,4	27,4	7,9±0,2
m. extensor digitorum brevis	40	7,3±0,5*	47,3	38	6,9±0,6*	54,4	10,6±0,4
m. gastrocnemius lateralis	38	29,3±1,6	34,8	38	30,1±1,6	32,2	31,5±0,5
m. flexor digitorum brevis	38	19,0±0,9	30,6	38	20,3±0,9	27,3	18,1±0,7
<b>2-я группа</b>							
m. rectus femoris	18	19,1±0,8	17,0	15	17,2±0,7	16,9	21,1±0,4
m. tibialis anterior	20	8,4±0,4	20,2	20	8,6±0,6	31,4	7,9±0,2
m. extensor digitorum brevis	16	7,7±0,8*	39,9	16	6,7±0,9*	55,0	10,6±0,4
m. gastrocnemius lateralis	20	26,6±1,8	29,5	20	26,5±1,7	28,9	31,5±0,5
m. flexor digitorum brevis	18	18,6±1,3	30,7	18	19,7±1,5	31,8	18,1±0,7

Примечание: \* — статистически значимое снижение амплитуды М-ответа по сравнению с нормой ( $p < 0,05$ ); n — количество тестируемых мышц.

Таблица 2

Средние значения параметров электромиографии при максимальном произвольном напряжении мышц нижних конечностей (M±m)

Мышца	До операции				После операции			Норма, мВ
		n	ЭМГ-параметры	CV, %	n	ЭМГ-параметры	CV, %	
<b>1-я группа</b>								
m. rectus femoris	A	36	0,36±0,03*	45,0	37	0,30±0,03*	61,7	0,41±0,04
	f	26	293±17	29,2	28	271±12	22,9	238±18
m. tibialis anterior	A	39	0,42±0,03*	40,5	37	0,45±0,03*	42,3	0,65±0,03
	f	26	436±13	14,8	30	428±25	32,4	304±14
m. gastrocnemius lateralis	A	35	0,22±0,02*	42,8	34	0,21±0,02*	45,8	0,40±0,05
	f	26	404±21	26,5	30	347±16	24,7	268±22
<b>2-я группа</b>								
m. rectus femoris	A	18	0,46±0,04 <sup>v</sup>	39,7	17	0,27±0,03**	47,8	0,41±0,04
	f	12	349±20	20,2	12	282±29	36,2	238±18
m. tibialis anterior	A	19	0,45±0,06*	56,0	15	0,38±0,03*	34,6	0,65±0,03
	f	12	408±32	27,0	12	386±32	28,5	304±14
m. gastrocnemius lateralis	A	18	0,26±0,03*	50,0	16	0,24±0,03*	48,4	0,40±0,05
	f	12	413±18	15,0	12	363±25	23,5	268±22

Примечание: \* — статистически значимое различие значений по сравнению с нормой, <sup>v</sup> — с 1-й группой, + — с дооперационным уровнем; p<0,05; n — количество тестируемых мышц; A — амплитуда, мВ; f — количество турнов в секунду.

существенно снижена (p<0,05) относительно нормы: на 12,5–44,1% в 1-й группе и на 31,3–34,3% — во 2-й, за исключением значений для m. rectus femoris во 2-й группе. Вариативность амплитуды произвольной ЭМГ сопоставима с вариативностью М-ответов.

Все зарегистрированные паттерны произвольной ЭМГ по характеру суммации в них потенциалов действия двигательных единиц можно разделить на два типа: насыщенная ЭМГ и редуцированная ЭМГ. В первом случае электрограмма произвольной активности представляет собой сложного вида ломаную линию, которая многократно в случайном порядке пересекает нулевой уровень. Весь отрезок записи равномерно заполнен спайками электрической активности, переходящими один в другой. Для расчета средней частоты произвольной ЭМГ использовались только насыщенные паттерны. Редуцированная ЭМГ представляет собой чередование на протяжении эпохи анализа насыщенных спайков активности с периодами электрического молчания. У пациентов 1-й группы паттерны редуцированной ЭМГ регистрировались билатерально и составляли 31,5–35,0% всех наблюдений. Во 2-й группе для всех мышц редуцированная ЭМГ встречалась в 40,0% случаев.

В процессе оперативного вмешательства методом МВП-тестирования у всех пациентов 2-й группы зафиксированы случаи снижения амплитуды МВП

более чем на 50% вплоть до полного исчезновения. При этом хирургом и анестезиологом применялись соответствующие меры для устранения возникшей проблемы (менялось положение, вплоть до удаления элементов конструкции, напряжение коррекционных усилий, вводились глюкокортикоиды). Критические изменения МВП были обратимыми (длительностью не более 15 мин с последующим возвращением к исходному уровню) и необратимыми (когда амплитуда МВП не восстанавливалась до конца операции). Однако у всех пациентов в послеоперационном периоде отсутствовали клинические признаки сенсомоторных расстройств.

После оперативной коррекции деформации позвоночника амплитуда М-ответов существенно не менялась (p>0,05) в обеих группах (см. табл. 1). Из табл. 2 видно, что у пациентов со спокойным течением оперативного вмешательства (1-я группа) в послеоперационном периоде отмечалось незначительное (p>0,05) снижение на 6,3–16,2% амплитуды ЭМГ относительно исходного уровня. Во 2-й группе это снижение было более ощутимым и составляло 9,6–41,7% по сравнению с дооперационным уровнем. Оно минимально для икроножных мышц (p>0,05) и максимально для прямой мышцы бедра (p<0,05). Снижение амплитуды ЭМГ для передней большеберцовой мышцы носило промежуточный характер, но оставалось статистиче-

ски незначимым ( $p > 0,05$ ). При этом количество паттернов редуцированной произвольной ЭМГ в 1-й группе сократилось после операции на 5–10% (до 20–30%), в то время как во 2-й группе оно оставалось практически без изменений, т.е. составляло 40%, за исключением *m. rectus femoris* справа, где количество паттернов снизилось на 6%.

### Обсуждение

Полученные результаты свидетельствуют, что функциональное ухудшение состояния нервно-мышечного аппарата подростков со сколиотической деформацией позвоночника в большей степени обусловлено не структурными, а функциональными изменениями, поскольку М-ответы большинства мышц несущественно отличаются от нормы, а произвольная амплитуда ЭМГ значительно снижена. Уменьшение уровня произвольной активности можно объяснить перестройкой центральных механизмов управления двигательной активностью в измененных биомеханических условиях и на фоне нарушения взаимодействия ЦНС с периферической частью эффекторного аппарата [16].

Подтверждением данного положения могут служить цереброспинальные индексы пациентов (табл. 3). При сравнении исходных ЭМГ-характеристик подростков из 1-й и 2-й групп мы не выявили существенных различий, т.е. возникновение интраоперационных негативных событий не предопределено состоянием нервно-мышечной системы больного.

Хирургическая коррекция деформации позвоночника оказывает мощное многофакторное воздействие на организм [17, 18]. В частности, под влиянием изменений баланса специфического и неспецифического компонентов соматосенсорной афферентации, а также за счет интенсивного потока сенсорных импульсов от тканевых интерорецепторов (включая ноцицепторы) активируются рефлекторные защитные механизмы, ограничивающие моторную активность пациентов в послеоперационном периоде [19–21]. Первоначально эти защитные механизмы позволяют организму оптимально распределять внутренние ресурсы в восстановительном периоде, но затем в связи с тонической природой защитных рефлексов они становятся препятствием в преодолении послеоперационной гиподинамии и гипокинезии. Плавному ослаблению охранительного торможения способствует послеоперационная ЛФК [22, 23] и электростимуляция [24, 25].

Установлено, что у пациентов со спокойным течением оперативного вмешательства (1-я группа) за две недели восстановительных занятий на-

блюдалось практически полное возвращение функционального состояния нервно-мышечного аппарата к исходному уровню, в то время как во 2-й группе, несмотря на отсутствие видимых клинических проблем, восстановление шло заметно медленнее. Существенная роль защитных рефлекторных механизмов, ограничивающих моторную активность, проявилась в межгрупповых различиях динамики редуцированных паттернов произвольной ЭМГ. Редуцированные паттерны ЭМГ возникают вследствие повышенной активности тормозных систем, ограничивающих интенсивность работы спинальных мотонейронных пулов соответствующих мышц [26]. В 1-й группе отмечалось заметное сокращение количества паттернов редуцированной ЭМГ, что указывает на ослабление тормозных влияний на моторную систему. Во 2-й группе данный параметр практически не изменялся, т.е. существующего комплекса ЛФК было недостаточно для преодоления тормозных эффектов оперативного воздействия. В связи с этим очевидно, что негативные интраоперационные события способствуют стабилизации механизмов охранительного торможения в послеоперационном периоде.

Отсутствие клинических признаков моторных расстройств в послеоперационном периоде не позволяет назначать пациентам специальные комплексы ЛФК либо дополнительную физиотерапию, например миоэлектростимуляцию [27–29]. Однако инструментальные методы исследования дают возможность выявить у пациентов, перенесших негативные интраоперационные события, более выраженные отклонения параметров ЭМГ, чем после спокойного течения операции, при отсутствии клинических признаков неврологических расстройств [11, 12]. Данное состояние получило условное обозначение субклинического сенсомоторного дефицита [30].

Незначительное снижение амплитуды произвольной ЭМГ относительно исходного уровня, наблюдаемое в контрольном обследовании, позволяет заключить, что используемый в послеоперационном периоде комплекс ЛФК помогает восстановить функциональное состояние мышц нижних конечностей до

Т а б л и ц а 3

Средние значения цереброспинального индекса (ЦСИ) мышц нижних конечностей ( $M \pm m$ )

Мышцы	Группа	До операции		После операции		Норма, %
		n	ЦСИ, %	n	ЦСИ, %	
<i>m. rectus femoris</i>	1-я	38	1,8±0,1	34	1,6±0,1	3,2–3,7
	2-я	18	2,1±0,3	15	1,7±0,2	
<i>m. tibialis anterior</i>	1-я	39	5,4±0,3	37	4,6±0,3	8,9–9,2
	2-я	20	5,3±0,8	20	3,9±0,6	
<i>m. gastrocnemius lateralis</i>	1-я	37	0,8±0,1	35	0,8±0,1	1,5–1,6
	2-я	18	0,9±0,1	18	0,8±0,1	

П р и м е ч а н и е: n — количество тестируемых мышц.

уровня, близкого к исходному. Однако хотя неблагоприятные интраоперационные события (изменения состояния моторной системы) и не приводят к клинически выраженным нарушениям, они существенно сказываются на характере двигательной активности пациентов в послеоперационном периоде, что снижает эффективность использования средств ЛФК.

## Заключение

Неблагоприятные интраоперационные события вызывают изменения состояния моторной системы, которые существенно сказываются на характере двигательной активности пациентов в послеоперационном периоде. Это снижает эффективность восстановительной терапии и может влиять на лечение деформации позвоночника.

Необходимы дальнейшие исследования для обоснования критериев оценки эффективности реабилитационного лечения с целью пересмотра оснований для назначения реабилитационных мероприятий, и в частности — для разработки специализированных комплексов ЛФК и проведения дополнительной терапии (миоэлектростимуляции) при наличии неблагоприятных интраоперационных событий.

**Благодарности.** Авторы выражают благодарность профессору А.П. Шеину за проведение ЭМГ-обследования пациентов и врачам ортопедического отделения №9 за помощь в лечении пациентов.

**Финансирование исследования.** Работа выполнена в рамках государственного задания «Разработка и оценка эффективности применения пациенториентированных имплантов в хирургии осевого скелета» (№4А-А18-118011190118-8).

**Сообщение о возможном конфликте интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## Литература/References

1. Долганова Т.И., Долганов Д.В., Рябых С.О. Диагностическая информативность огибающей ЭМГ поверхностных паравертебральных мышц в постуральных стереотипах у пациентов со сколиозом III–IV степени. *Гений ортопедии* 2018; 24(1): 57–63, <https://doi.org/10.18019/1028-4427-2018-24-1-57-63>.

Dolganova T.I., Dolganov D.V., Riabykh S.O. Diagnostic information value of EMG envelope algorithm for superficial paraspinal muscles in postural stereotypes of patients with scoliosis grades III and IV. *Genij ortopedii* 2018; 24(1): 57–63, <https://doi.org/10.18019/1028-4427-2018-24-1-57-63>.

2. Щурова Е.Н., Менщикова Т.И., Филимонова Г.Н. Сопоставление ультразвуковых и морфологических результатов исследования паравертебральных мышц на вершине деформации у больных с кифосколиозом на фоне нейрофиброматоза I типа. *Гений ортопедии* 2018; 24(1): 70–74, <https://doi.org/10.18019/1028-4427-2018-24-1-70-74>.

Shchurova E.N., Menshchikova T.I., Filimonova G.N. Comparison of ultrasonographic and morphological findings of paravertebral muscles at the apex of kyphoscoliosis in patients

with neurofibromatosis type I. *Genij ortopedii* 2018; 24(1): 70–74, <https://doi.org/10.18019/1028-4427-2018-24-1-70-74>.

3. Войтенков В.Б., Минькин А.В., Екушева Е.В., Скрипченко Н.В., Самойлова И.Г., Черкашина И.В. Состояние мышц туловища при ортезировании пояснично-крестцового отдела позвоночника (обзор литературы). *Гений ортопедии* 2018; 24(1): 102–107, <https://doi.org/10.18019/1028-4427-2018-24-1-102-107>.

Voitenkov V.B., Min'kin A.V., Ekusheva E.V., Skripchenko N.V., Samoilova I.G., Cherkashina I.V. Condition of the muscles of the back under lumbo-sacral orthotic treatment (literature review). *Genij ortopedii* 2018; 24(1): 102–107, <https://doi.org/10.18019/1028-4427-2018-24-1-102-107>.

4. Holdefer R.N., Skinner S.A. Motor evoked potential recovery with surgeon interventions and neurologic outcomes: a meta-analysis and structural causal model for spine deformity surgeries. *Clin Neurophysiol* 2020; 131(7): 1556–1566, <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2020.03.024>.

5. Nagarajan L., Ghosh S., Dillon D., Palumbo L., Woodland P., Thalayasingam P., Lethbridge M. Intraoperative neurophysiology monitoring in scoliosis surgery in children. *Clin Neurophysiol Pract* 2019; 4: 11–17, <https://doi.org/10.1016/j.cnp.2018.12.002>.

6. Сайфутдинов М.С., Скрипников А.А., Савин Д.М., Очирова П.В., Третьякова А.Н. Методические проблемы развития интраоперационного нейромониторинга при оперативной коррекции деформаций позвоночника (обзор литературы). *Гений ортопедии* 2017; 23(1): 102–110, <https://doi.org/10.18019/1028-4427-2017-23-1-102-110>.

Saifutdinov M.S., Skripnikov A.A., Savin D.M., Ochirova P.V., Tretyakova A.N. Methodological problems of intraoperative neuromonitoring during operative correction of spinal deformity (literature review). *Genij ortopedii* 2017; 23(1): 102–110, <https://doi.org/10.18019/1028-4427-2017-23-1-102-110>.

7. Acharya S., Palukuri N., Gupta P., Kohli M. Transcranial motor evoked potentials during spinal deformity corrections — safety, efficacy, limitations, and the role of a checklist. *Front Surg* 2017; 4: 8, <https://doi.org/10.3389/fsurg.2017.00008>.

8. Kobayashi K., Imagama S., Ito Z., Ando K., Hida T., Ito K., Tsushima M., Ishikawa Y., Matsumoto A., Nishida Y., Ishiguro N. Transcranial motor evoked potential wave form changes in corrective fusion for adolescent idiopathic scoliosis. *J Neurosurg Pediatr* 2017; 19(1): 108–115, <https://doi.org/10.3171/2016.6.peds16141>.

9. Kim D.G., Jo S.R., Park Y.S., Hyun S.J., Kim K.J., Jahng T.A., Kim H.J., Park K.S. Multi-channel motor evoked potential monitoring during anterior cervical discectomy and fusion. *Clin Neurophysiol Pract* 2017; 2: 48–53, <https://doi.org/10.1016/j.cnp.2016.12.006>.

10. Ney J.P., Kessler D.P. Neurophysiological monitoring during cervical spine surgeries: longitudinal costs and outcomes. *Clin Neurophysiol* 2018; 129(11): 2245–2251, <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2018.08.002>.

11. Сайфутдинов М.С., Рябых С.О. Нейрофизиологический контроль функционального состояния пирамидной системы в процессе лечения больных с деформацией позвоночника. *Неврологический журнал* 2018; 23(5): 248–258.

Saifutdinov M.S., Ryabykh S.O. Neurophysiological control of somatic motor system functional status during treatment of patients with spinal deformity. *Nevrologicheskij zurnal* 2018; 23(5): 248–258.

12. Шеин А.П., Сайфутдинов М.С., Скрипников А.А., Криворучко Г.А., Рябых С.О. Интраоперационный и после-

операционный нейромониторинг моторного дефицита у пациентов с деформациями позвоночника. *Хирургия. Журнал им. Н.И. Пирогова* 2017; 4: 19–23, <https://doi.org/10.17116/hirurgia2017419-23>.

Shein A.P., Sayphutdinov M.S., Skripnikov A.A., Krivoruchko G.A., Ryabykh S.O. Correlation of the intraoperative neuromonitoring data and EMG-characteristics of post-operative motor deficit in patients with spinal deformities. *Khirurgiya. Zhurnal imeni N.I. Pirogova* 2017; 4: 19–23, <https://doi.org/10.17116/hirurgia2017419-23>.

13. WHO. *Child growth standards*. URL: <https://www.who.int/tools/child-growth-standards>.

14. Шеин А.П., Скрипников А.А., Криворучко Г.А. Билатеральные взаимосвязи ЭНМГ- и ЭЭГ-характеристик пирамидной недостаточности у больных с последствиями инсульта и травмы головного мозга. *Бюллетень Восточно-Сибирского научного центра Сибирского отделения Российской академии медицинских наук* 2012; 2–2: 67–70.

Shein A.P., Skripnikov A.A., Krivoruchko G.A. Bilateral interrelations of ENMG and EEG-characteristics of pyramid insufficiency in patients with the consequences of stroke and of brain injury. *Bulleten' Vostочно-Sibirskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii medicinskih nauk* 2012; 2–2: 67–70.

15. Шевцов В.И., Шеин А.П., Скрипников А.А., Криворучко Г.А. Реактивность и пластичность коры головного мозга в условиях вазоактивной краниопластики. Курган: Дамми; 2006; 128 с.

Shevtsov V.I., Shein A.P., Skripnikov A.A., Krivoruchko G.A. *Reaktivnost' i plastichnost' kory golovnoy mozga v usloviyakh vazoaktivnoy kranioplastiki* [Reactivity and plasticity of the cerebral cortex in vasoactive cranioplasty]. Kurgan: Dammi; 2006; 128 p.

16. Domenech J., García-Martí G., Martí-Bonmatí L., Barrios C., Tormos J.M., Pascual-Leone A. Abnormal activation of the motor cortical network in idiopathic scoliosis demonstrated by functional MRI. *Eur Spine J* 2011; 20(7): 1069–1078, <https://doi.org/10.1007/s00586-011-1776-8>.

17. Nagarajan L., Ghosh S., Dillon D., Palumbo L., Woodland P., Thalayasingam P., Lethbridge M. Intraoperative neurophysiology monitoring in scoliosis surgery in children. *Clin Neurophysiol Pract* 2019; 4: 11–17, <https://doi.org/10.1016/j.cnp.2018.12.002>.

18. Charalampidis A., Jiang F., Wilson J.R.F., Badhiwala J.H., Brodke D.S., Fehlings M.G. The use of intraoperative neurophysiological monitoring in spine surgery. *Global Spine J* 2020; 10(1 Suppl): 104S–114S, <https://doi.org/10.1177/2192568219859314>.

19. Melzack R., Wall P.D. Pain mechanisms: a new theory. *Science* 1965; 150(3699): 971–979, <https://doi.org/10.1126/science.150.3699.971>.

20. Алатырев В.И., Еремеев А.М., Зефиоров Л.Н. Тонические защитные рефлексы и рефлекторные реакции скелетных мышц. *Физиологический журнал СССР им. Сеченова* 1987; 73(2): 295–301.

Alatyrev V.I., Eremeev A.M., Zefirov L.N. Tonic defense reflexes and reflex reactions of skeletal muscles. *Fiziologicheskij zhurnal SSSR imeni I.M. Sechenova* 1987; 73(2): 295–301.

21. Алатырев В.И., Еремеев А.М., Плещинский И.Н. Влияние длительного ноцицептивного раздражения на двигательные функции человека. *Физиология человека* 1990; 16(3): 77–83.

Alatyrev V.I., Eremeev A.M., Pleshchinskiy I.N. The effect of long-term nociceptive irritation on human motor functions. *Fiziologiya cheloveka* 1990; 16(3): 77–83.

22. Nicolini-Panisson R.D.A., Tedesco A.P., Folle M.R., Donadio M.V.F. Selective dorsal rhizotomy in cerebral palsy: selection criteria and postoperative physical therapy protocols. *Rev Paul Pediatr* 2018; 36(1): 9, <https://doi.org/10.1590/1984-0462/2018;36;1;00005>.

23. Епифанов В.А., Епифанов А.В. *Реабилитация в неврологии*. М: ГЭОТАР-Медиа; 2015; 416 с.

Epifanov V.A., Epifanov A.V. *Reabilitatsiya v neurologii* [Rehabilitation in neurology]. Moscow: GEOTAR-Media; 2015; 416 p.

24. Ерохин А.Н., Григорович К.А. Алгоритм подбора оптимального режима электростимуляции спинного мозга при хроническом болевом синдроме. *Нейрохирургия* 2014; 2: 45–48.

Erokhin A.N., Grigorovich K.A. The algorithm for choice of optimal mode for spinal cord electrostimulation in treatment of chronic pain syndrome. *Neirokhirurgiya* 2014; 2: 45–48.

25. Шеин А.П., Криворучко Г.А., Прудникова О.Г. Электронейромиографическая оценка эффективности временной эпидуральной электронейростимуляции в сочетании с роботизированной кинезотерапией при лечении больных с последствиями позвоночно-спинномозговой травмы. *Физиология человека* 2015; 41(2): 98–104.

Shein A.P., Krivoruchko G.A., Prudnikova O.G. Electroneuromyographic assessment of the effectiveness of temporal epidural electrostimulation combined with robotic kinesiotherapy in the treatment of patients suffering from the consequences of spinal cord injury. *Fiziologiya cheloveka* 2015; 41(2): 98–104.

26. Плещинский И.Н., Алексеева Н.Л. Спинной мозг: афферентные взаимодействия. *Физиология человека* 1996; 22(1): 123–130.

Pleshchinskiy I.N., Alekseeva H.L. Spinal cord: afferent interactions. *Fiziologiya cheloveka* 1996; 22(1): 123–130.

27. Holdefer R.N., Skinner S.A. Motor evoked potential recovery with surgeon interventions and neurologic outcomes: a meta-analysis and structural causal model for spine deformity surgeries. *Clin Neurophysiol* 2020; 131(7): 1556–1566, <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2020.03.024>.

28. Nagarajan L., Ghosh S., Dillon D., Palumbo L., Woodland P., Thalayasingam P., Lethbridge M. Intraoperative neurophysiology monitoring in scoliosis surgery in children. *Clin Neurophysiol Pract* 2019; 4: 11–17, <https://doi.org/10.1016/j.cnp.2018.12.002>.

29. Charalampidis A., Jiang F., Wilson J.R.F., Badhiwala J.H., Brodke D.S., Fehlings M.G. The use of intraoperative neurophysiological monitoring in spine surgery. *Global Spine J* 2020; 10(1 Suppl): 104S–114S, <https://doi.org/10.1177/2192568219859314>.

30. Шеин А.П., Криворучко Г.А., Щурова Е.Н., Коваленко П.И., Поздняков А.В. Влияние степени деформации позвоночника на нейрофизиологические характеристики сенсомоторного дефицита. *Хирургия позвоночника* 2007; 1: 35–43, <https://doi.org/10.14531/ss2007.1.35-43>.

Shein A.P., Krivoruchko G.A., Schurova E.N., Kovalenko P.I., Pozdnyakov A.V. The effect of spinal deformity grade on neurophysiological characteristics of sensorimotor deficit. *Hirurgia pozvonocnika* 2007; 1: 35–43, <https://doi.org/10.14531/ss2007.1.35-43>.