

DOI: <https://doi.org/10.17650/2222-8721-2025-15-2-58-64>

Угнетение сегментарного цервикального вызванного моторного ответа при postanоксической энцефалопатии у ребенка: клинический случай

Д.С. Каньшина¹, Т.А. Ахадов¹, В.П. Зыков², С.С. Никитин³

¹ГБУЗ «Научно-исследовательский институт неотложной детской хирургии и травматологии — Клиника доктора Рошала» Департамента здравоохранения г. Москвы; Россия, 119180 Москва, ул. Большая Полянка, 22;

²ФГБОУ ДПО «Российская медицинская академия непрерывного профессионального образования» Минздрава России; Россия, 125993 Москва, ул. Баррикадная, 2/1, стр. 1;

³ФГБНУ «Медико-генетический научный центр им. акад. Н.П. Бочкова»; Россия, 115522 Москва, ул. Москворечье, 1

Контакты: Дарья Сергеевна Каньшина dr.d.kanshina@gmail.com

В статье представлен клинический случай угнетения цервикального сегментарного вызванного моторного ответа у ребенка с postanоксической энцефалопатией. Нами было проведено динамическое обследование пациентки 4 лет после перенесенного острого postanоксического состояния (утопление в пресной воде) с использованием одностимульной магнитной стимуляции, магнитно-резонансной трактографии с реконструкцией кортикоспинального тракта от первичной моторной коры и дополнительной моторной зоны, сегментацией и морфометрией головного мозга. Постаноксическое состояние у ребенка 4 лет привело не только к выпадению кортикальных вызванных моторных ответов, но и к угнетению сегментарного цервикального вызванного моторного ответа при сохранности периферического проведения. Полученные данные свидетельствуют о негативном эффекте гипоксии на проводящую функцию проксимального отдела периферической нервной системы, что, вероятно, усугубляет процесс моторного восстановления пациентов с postanоксической энцефалопатией.

Ключевые слова: postanоксическая энцефалопатия, кортикоспинальный тракт, транскраниальная магнитная стимуляция, вызванный моторный ответ

Для цитирования: Каньшина Д.С., Ахадов Т.А., Зыков В.П., Никитин С.С. Угнетение сегментарного цервикального вызванного моторного ответа при postanоксической энцефалопатии у ребенка: клинический случай. Нервно-мышечные болезни 2025;15(2):58–64.

DOI: <https://doi.org/10.17650/2222-8721-2025-15-2-58-64>

Suppression of segmental cervical motor evoked potential in postanoxic encephalopathy in a child: clinical case

D.S. Kanshina¹, T.A. Akhadov², V.P. Zykov², S.S. Nikitin³

¹Research Institute of Emergency Pediatric Surgery and Trauma — Dr. Roshal's Clinic, Moscow Healthcare Department; 22 Bolshaya Polyanka St., Moscow 119180, Russia;

²Russian Medical Academy of Continuing Professional Education, Ministry of Health of Russia; Build. 1, 2/1 Barrikadnaya St., Moscow 125993, Russia;

³Research Centre for Medical Genetics; 1 Moskvorechye St., Moscow 115522, Russia

Contacts: Darya Sergeevna Kanshina dr.d.kanshina@gmail.com

We present a clinical case of suppression of cervical segmental motor evoked potential in a child with post anoxic encephalopathy. We performed a dynamic examination of a 4-year-old female patient after acute post hypoxia (freshwater drowning) using single-pulse magnetic stimulation, magnetic resonance tractography with reconstruction of the corticospinal tract from the primary motor cortex and supplemental area, segmentation and morphometry of brain. Post hypoxic damage in a 4-year-old child resulted not only in the loss of cortical motor evoked potentials, but also

in the suppression of segmental cervical motor evoked potentials with preservation of peripheral ones. The obtained data indicate the negative effect of hypoxia on the conducting function of the proximal part of the peripheral nervous system, which probably aggravates the process of motor recovery of patients with post anoxic encephalopathy.

Keywords: post anoxic encephalopathy, corticospinal tract, transcranial magnetic stimulation, motor evoked potential

For citation: Kanshina D.S., Akhadov T.A., Zykov V.P., Nikitin S.S. Suppression of segmental cervical motor evoked potential in postanoxic encephalopathy in a child: clinical case. *Nervno-myshechnye bolezni = Neuromuscular Diseases* 2025;15(2):58–64. (In Russ.).

DOI: <https://doi.org/10.17650/2222-8721-2025-15-2-58-64>

Эффекты острой и хронической гипоксии на состояние нейронов центральной нервной системы изучены достаточно подробно, при этом наблюдается дефицит информации о влиянии гипоксии на периферическую нервную систему [1]. В отдельных экспериментальных исследованиях доказано влияние функционального состояния супрапонтинных центров регуляции в условиях гипоксии на рефлексы в ответ на электрический импульс и активность спинномозговых сетей в рамках моделирующего взаимодействия головного мозга с нижележащими уровнями [2]. В то же время доказано анатомическое различие строения эндоневрия корешка и периферического нерва, а также наличие неравномерности распределения ионных каналов миелинового слоя в периферической нервной системе [3, 4]. Нарушение микроциркуляции в периферической нервной системе определяет ряд патофизиологических процессов, например в патогенезе нейропатического болевого синдрома [4–6]. Однако снижение возбудимости сегментарного вызванного моторного ответа (ВМО) при сохранности ответа на стандартную периферическую электрическую стимуляцию является интересным клиническим феноменом, патофизиологический механизм которого в отсутствие аутоиммунного или травматического повреждения дискутабелен.

Клинический случай

Пациентка Б., 4 лет, впервые поступила в отделение реабилитации Научно-исследовательского института неотложной детской хирургии и травматологии в декабре 2023 г., через 5 мес от развития острого postanoxического состояния (утопление в пресной воде), в состоянии минимального уровня сознания (+), со спастическим тетрапарезом (оценка по шкале GMFSC 5 баллов). В статусе регистрировались пароксизмальные моторные феномены, идентифицированные как дистонические атаки центрального генеза. В период 2023–2024 гг. трижды госпитализировалась для реабилитации и проведения диагностической одностимульной магнитной стимуляции (ОСМС). ОСМС выполнялась с помощью монофазного магнитного стимулятора «Нейро-МС» и двухканального миографа «Нейро-МВП микро» (Нейрософт, Россия), с использованием кольцевого индуктора диаметром 9 см. Область стимуляции локализована при подаче однократных стимулов интенсивностью от 50 % в проекции F3

для левой и F4 для правой гемисферы согласно международной схеме «10–20». Направление электрического тока в кольцевом индукторе для активации левого полушария — по часовой стрелке, для правого — против. ВМО с т. *abductor pollicis brevis* регистрировали накожными электродами с 2 сторон в соответствии с контралатеральной схемой регистрации [7]. Поиск ВМО проводился согласно алгоритму Rossini–Rothwell [8]. Сегментарная стимуляция на уровне шейного утолщения выполнялась после доказательства наличия F-волн при стандартной регистрации в ответ на супрамаксимальную стимуляцию на уровне запястья. Для получения сегментарного ВМО внешний диаметр нижней части койла располагали на уровне остистого отростка C7. В ответ на стимул интенсивностью от 30 до 70 % выходной мощности стимулятора в каждом случае регистрировали не менее 3 ВМО при максимальном мышечном расслаблении под контролем спонтанной миограммы [9]. Также периферический ВМО регистрировался в ответ на магнитную стимуляцию при расположении койла над плечевым сплетением в надключичной области и в области локтевого сгиба с обеих сторон; в каждом случае регистрировали не менее 3 воспроизводимых ВМО в ответ на стимул интенсивностью от 30 % выходной мощности стимулятора при соблюдении максимального мышечного расслабления, контролируемого накожной миограммой [9].

Во 2-ю и 3-ю госпитализацию — через 6 и 10 мес от момента развития postanoxического состояния соответственно — была выполнена морфометрия головного мозга (ГМ). Применялась технология автоматического количественного объемного анализа ГМ с использованием трехмерного изображения в режиме изотропного T1-сканирования с разрешением по 3 координатам 1 мм. Параметры сканирования: TFE (спин-эхо импульсная последовательность, TR = 8 мс, TE = 3,7 мс, FA = 80, TI = 1021 мс, FOV = 240 мм, NSA = 1). Количественный объемный анализ проводился с использованием автоматизированного программного пакета vol2brain, позволяющего получить значения объемов серого, белого вещества ГМ, спинномозговой жидкости, а также корковых и подкорковых структур. В данной работе анализировались объемы прецентральной извилины, дополнительной моторной зоны (ДМЗ) и средней лобной извилины.

Для исследования кортикоспинального тракта первичной моторной коры и ДМЗ через 6 мес от момента

утопления (2-я госпитализация) применялась методика диффузионно-тензорной трактографии. Параметры сканирования: EPI (эхо-планарная импульсная последовательность), TR = 9431 мс, TE = 70 мс, матрица 120/144 пикселей, FOV = 240 мм, размер вокселя $2 \times 2 \times 2$ мм³, фактор ускорения EPI factor = 63, gap = 0, NSA = 2. Диффузионные градиенты были приложены в 32 неколлинеарных направлениях. Обработку данных диффузионно-тензорной трактографии проводили с помощью программного пакета MR Fiber Track в сервере программных приложений Philips Intellispace Portal. При анализе данных трактографии оценивались следующие показатели диффузии: ADC (apparent diffusion coefficient — измеряемый коэффициент диффузии, представляющий собой количественную оценку диффузионной способности молекулы воды в биологической ткани) и FA (fractional anisotropy — коэффициент фракционной анизотропии, характеризующий отличие диффузии в разных направлениях). Кроме того, анализировались объем и протяженность кортикоспинальных трактов. Для полуавтоматического построения трактов проводился

ручной выбор парных зон интереса (regions of interest, ROI) в обоих полушариях:

- 1) субкортикальное белое вещество в области первичной моторной коры — латеральные отделы средней трети моста мозга;
- 2) субкортикальное белое вещество в области ДМЗ — латеральные отделы средней трети моста мозга.

За период наблюдения отмечена положительная динамика клинических нарушений в виде уменьшения частоты и длительности дистонических атак и снижения выраженности спастического тетрапареза на фоне приема миорелаксантов центрального действия; ребенок продолжал оставаться в состоянии минимального уровня сознания (+) при отсутствии произвольных движений (оценка по GMFSC 5 баллов).

По данным морфометрии ГМ выявлено уменьшение объема и толщины кортикального слоя относительно возрастной нормы прецентральной извилины, ДМЗ и средней лобной извилины как в промежуточном, так и в отдаленном периодах postanoxic энцефалопатии (табл. 1).

Таблица 1. Результаты морфометрического автоматического количественного объемного анализа головного мозга в промежуточном (6 мес) и отдаленном (10 мес) периодах postanoxic энцефалопатии

Table 1. Results of morphometric automatic quantitative volumetric analysis of the brain in the intermediate (6 months) and remote (10 months) periods of postanoxic encephalopathy

Показатель Parameter	Промежуточный период Intermediate period			Отдаленный период Long term period		
	Общий объем, см ³ /% Total volume, cm ³ /%	Объем слева, см ³ /% Left volume, cm ³ /%	Объем справа, см ³ /% Right volume, cm ³ /%	Общий объем, см ³ /% Total volume, cm ³ /%	Объем слева, см ³ /% Left volume, cm ³ /%	Объем справа, см ³ /% Right volume, cm ³ /%
Прецентральная извилина Precentral gyrus						
Объем Volume	18,43*	8,95*	9,48*	17,71*	8,46*	9,25*
ТКС CT	1,76*	1,93	1,61*	1,50*	1,39*	1,61*
Дополнительная моторная зона Supplementary motor area						
Объем Volume	7,16*	3,81*	3,36*	6,94*	3,65*	3,30*
ТКС CT	2,23*	2,30*	2,15*	2,19*	2,14*	2,23*
Средняя лобная извилина Middle frontal gyrus						
Объем Volume	27,70*	14,46*	13,23*	25,68*	13,13*	12,55*
ТКС CT	2,42*	2,52	2,31*	2,14*	2,22*	2,05*

*Наличие гипотрофии объема в сравнении с возрастной нормой.

Примечание. ТКС — толщина кортикального слоя.

*Presence of volume hypotrophy in comparison with the age norm.

Note. CT — cortical thickness.

Таблица 2. Результаты магнитно-резонансной трактографии от дополнительной моторной зоны и первичной моторной коры в промежуточном периоде
Table 2. Magnetic resonance tractography results from the supplementary motor area and primary motor cortex in the intermediate period

Область головного мозга Brain area	Промежуточный период Intermediate period			
	Объем, мм ³ Volume, mm ³	Длина, мм Length, mm	FA	ADC, 10 ⁻³ мм ² /с ADC, 10 ⁻³ mm ² /s
ДМЗ слева SMA left	1061	130	0,428	0,944
ДМЗ справа SMA right	466	99,9	0,396	0,947
ПМК слева PMC left	1566	127	0,401	1,083
ПМК справа PMC right	1316	101	0,412	1,215

Примечание. ДМЗ — дополнительная моторная зона; ПМК — первичная моторная кора; FA — коэффициент фракционной анизотропии; ADC — измеряемый коэффициент диффузии.

Note. SMA — supplementary motor area; PMC — primary motor cortex; FA — fractional anisotropy; ADC — apparent diffusion coefficient.

Несмотря на дефицит объема кортикального моторного представительства, кортикоспинальные моторные проекции от ДМЗ и первичной моторной коры были получены при построении в обоих полушариях, однако их объемы интерпретированы рентгенологами как «обедненные». Отмечена асимметрия между кортикоспинальным трактом от ДМЗ с уменьшением объема в 2 раза в правом полушарии (табл. 2).

При проведении диагностической ОСМС в динамике во время каждой госпитализации были получены схожие результаты: отсутствие кортикальных и цервикальных сегментарных ВМО при сохранности периферических ВМО

(стимуляция на уровне плечевого сплетения). При выполнении стимуляционной электронейромиографии M- и F-волны, зарегистрированные при накожном отведении с *m. abductor pollicis brevis* при чрескожной стимуляции ствола срединного нерва на уровне запястья с обеих сторон, соответствовали возрастной норме по амплитуде и латентности (рис. 1, 2).

С учетом наличия дистонических атак центрального генеза и спастического тетрапареза при минимальном уровне сознания (+) регистрация ответов также проводилась при непреднамеренной фасилитации (табл. 3).

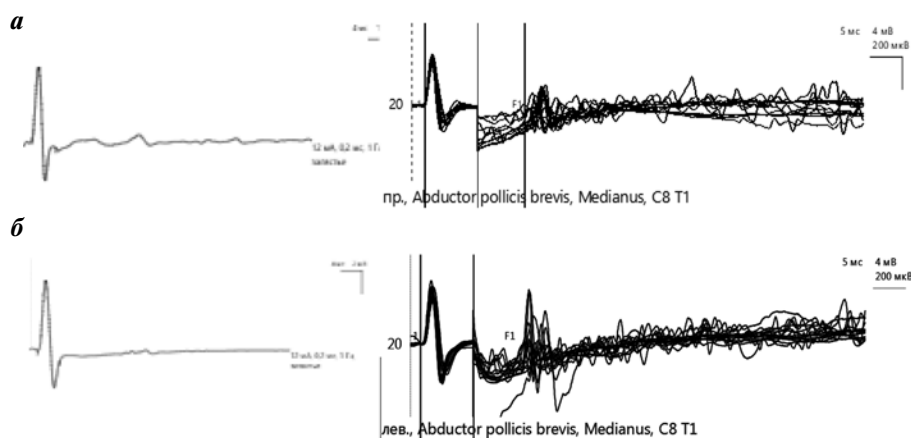


Рис. 1. M- и F-волны с *m. abductor pollicis brevis* с 2 сторон при стимуляции срединных нервов на уровне запястья: а — M-волна и F-волны при стимуляции правого срединного нерва на уровне запястья (параметры стимула: интенсивность — 12 мА, длительность — 0,2 мс, 1 Гц; развертка 4 мс/2 мВ/дел и 5 мс/4 мВ/200 мкВ/дел); б — M-волна и F-волны при стимуляции левого срединного нерва на уровне запястья (параметры стимула: интенсивность — 12 мА, длительность — 0,2 мс, 1 Гц; развертка 4 мс/2 мВ/дел и 5 мс/4 мВ/200 мкВ/дел)

Fig. 1. M and F waves from *m. abductor pollicis brevis* on both sides during median nerve stimulation at the wrist: a — M-wave and F-waves during nerve conduction study of the right n. medianus at the wrist (stimulus parameter: intensity — 12 mA, duration — 0.2 ms, 1 Hz; sweep 4 ms/2 mV/division and 5 ms/4 mV/200 uV division); б — M wave and F waves during nerve conduction study of the left n. medianus at the wrist (stimulus parameter: intensity — 12 mA, duration — 0.2 ms, 1 Hz; sweep 4 ms/2 mV/division and 5 ms/4 mV/200 uV division)

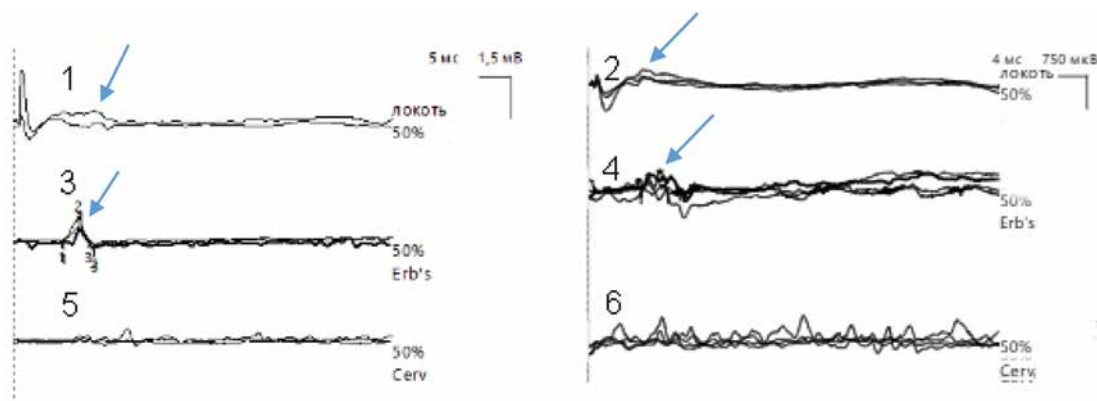


Рис. 2. Регистрация вызванных моторных ответов (ВМО) при отведении с *m. abductor pollicis brevis* с 2 сторон при сегментарной и периферической одностимульной магнитной стимуляции (ОСМС). 1, 2 – ВМО с *m. abductor pollicis brevis* справа/слева при ОСМС интенсивностью 50 % на уровне локтевого сгиба – невозможно определить ВМО из-за наложения артефакта стимула; 3, 4 – ВМО с *m. abductor pollicis brevis* справа/слева при ОСМС интенсивностью 50 % в точке Эрба; 5, 6 – ВМО с *m. abductor pollicis brevis* справа/слева при ОСМС интенсивностью 50 % на уровне цервикального утолщения. Кривые 1, 3, 5 – развертка 5 мс/1,5 мВ/дел; кривые 2, 4, 6 – развертка 4 мс/750 мкВ/дел

Fig. 2. Registration of motor evoked potential (MEPs) from *m. abductor pollicis brevis* on both sides during segmental and peripheral single-pulse magnetic stimulation (SPMS). 1, 2 – MEPs from *m. abductor pollicis brevis* right/left during SPMS 50 % of intensity at the elbow bend – impossible to determine MEPs due to stimulus artifact overlap; 3, 4 – MEPs from *m. abductor pollicis brevis* right/left during SPMS 50 % of intensity at the Erb point; 5, 6 – MEPs from *m. abductor pollicis brevis* right/left during SPMS 50 % of intensity at the cervical level. Curves 1, 3, 5 – sweep 5 ms/1.5 mV/division; curves 2, 4, 6 – sweep 4 ms/750 uV/division

Таблица 3. Параметры электронейромиографии при чрескожной электрической стимуляции срединного нерва на уровне запястья и периферической одностимульной магнитной стимуляции в точке Эрба

Table 3. Electroneuromyography parameters during transcutaneous electrical stimulation of the *n. medianus* at the wrist level and peripheral single-pulse magnetic stimulation at the Erb point

Электронейромиография Electroneuromyography			Одностимульная магнитная стимуляция Single-pulse magnetic stimulation		
Параметр М- и F-волн Parameter of M and F waves	<i>m. abductor pollicis brevis</i> справа <i>m. abductor pollicis brevis</i> right	<i>m. abductor pollicis brevis</i> слева <i>m. abductor pollicis brevis</i> left	Параметр моторного вызванного потенциала в точке Эрба Parameter of motor evoked potential at the Erb point	<i>m. abductor pollicis brevis</i> справа <i>m. abductor pollicis brevis</i> right	<i>m. abductor pollicis brevis</i> слева <i>m. abductor pollicis brevis</i> left
Амплитуда М-волны, мВ M-wave amplitude, mV	3,2	6,2	Моторный порог, % Motor threshold, %	50	50
Латентность М-волны, мс M-wave latency, ms	2,0	1,6	Амплитуда, мВ Amplitude, mV	0,784	0,645
Минимальная латентность F-волны, мс Minimal latency of F wave, ms	17,4	16,3	Латентность, мс Latency, ms	7,68	7,24

Отсутствие кортикальных ВМО при сохранности, но обеднении кортикоспинальных трактов в условиях гипотрофии объема, в том числе кортикального слоя первичной моторной коры, является ожидаемым результатом при тяжелой postanоксической энцефалопатии у детей [10, 11].

Сохраняющееся нормальное проведение и возбудимость периферических нервов в ответ на электрическую и магнитную стимуляцию подразумевают также

нормальное состояние самых проксимальных отделов нервных стволов. Однако в описанном случае выявлено угнетение сегментарного цервикального ВМО в ответ на магнитную стимуляцию. Среди возможных причин обнаруженных долгосрочных изменений, присутствующих на протяжении до 10 мес от момента утолщения, необходимо рассмотреть возможные патофизиологические причины и особенности строения проксимального участка периферического нерва.

Патофизиология повреждения нервных корешков в условиях системной гипоксии сложна: известно, что решающее значение могут иметь иммунологические, воспалительные, нейрохимические процессы и ишемия [1, 12, 13]. Анатомически границей, разделяющей корешковую систему и периферический нерв, является зона сливания твердой мозговой оболочки и эпинеурия, что, вероятно, делает этот участок наиболее уязвимым при рассматриваемом нами случае [1, 14].

В межпозвонковых отверстиях нервные корешки окружены плотной дуральной оболочкой и могут быть более восприимчивы к отеку, чем периферические нервы [15]. В большинстве экспериментальных исследований моделировали эффекты острой гипоксии с оценкой влияния на ионные каналы: кальциевые, натриевые и калиевые. Высказана «мембранная гипотеза», в соответствии с которой существуют неизвестные пока белковые ансамбли, прямо или дистантно связанные с большими кальций-зависимыми и другими калиевыми каналами. Авторы данной гипотезы полагают, что чувствительными к недостатку кислорода в клетке являются процессы взаимодействия ассоциированных с этими каналами белков, таких как гемоксигеназа 2, NADP (H), цистионин-гаммалиаза, гуанилатциклаза, циклический гуанозинмонофосфат и протеинкиназа G [16]. Следовательно, гипоксия влияет на баланс клеточных окислительно-восстановительных пар, что приводит к модификации тиоловых групп и изменению свойств каналов. Более подробно каналопатии изучались в рамках нейропатического синдрома при экспериментальном поспигипоксическом поражении дорсального ганглия сенсорной корешковой системы [4].

В экспериментальных моделях было доказано регулирующее влияние супрапонтинных центров на стволовые и спинномозговые нейросети, следовательно, было бы логично предположить нисходящее супраспинальное влияние на возбудимость мотонейронов цервикального утолщения при атрофических изменениях первичной моторной коры в нашем клиническом наблюдении. Однако отсутствие значимых изменений параметров F-волн и достаточная амплитуда M-волн

исключают изменение возбудимости сегментарных мотонейронов при тяжелой постаноксической энцефалопатии [2].

Во время сегментарной магнитной стимуляции индуцированные токи концентрируются в межпозвонковых отверстиях и активируют преимущественно толстые нервные волокна спинномозговых нервов, за счет чего и формируется сегментарный ВМО [17, 18].

Перспективной с целью подтверждения гипотезы снижения возбудимости корешковой системы цервикального уровня в условиях системной гипоксии, вероятно, является инвазивная регистрация потенциала моторного корешка, однако воспроизвести ее в клинических условиях не только сложно, но и едва ли оправдано с этической точки зрения.

Учитывая вышесказанное, в патогенезе выявленных изменений наиболее вероятным объяснением выглядит нарушение ионных каналов, оказывающих влияние на процесс локальной деполяризации нерва в межпозвонковом отверстии, после эпизода острой гипоксии [4, 16, 19].

С учетом отсутствия в анализируемых нами источниках нормативных значений порога сегментарного ВМО у детей в возрасте 4–6 лет и с целью подтверждения феномена угнетения сегментарного цервикального ВМО в представленном клиническом случае нами была набрана контрольная группа, состоящая из 15 здоровых детей. В результате обследования диапазон интенсивности стимула при ОСМС, достаточного для воспроизведения сегментарного цервикального ВМО, в контрольной группе оказался в пределах 30–40 % от максимальной выходной мощности стимулятора. Это дает нам основание интерпретировать невозможность регистрации сегментарного цервикального ВМО у детей 4–6 лет с постаноксической энцефалопатией при интенсивности ≥ 50 % как угнетение.

Таким образом, угнетение сегментарного цервикального ВМО при тяжелой постаноксической энцефалопатии у ребенка является неслучайным клиническим наблюдением, патофизиологические механизмы которого требуют дальнейшего уточнения.

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Gruss M., Ettore G., Stehr A. et al. Moderate hypoxia influences excitability and blocks dendrotoxin sensitive K^+ currents in rat primary sensory neurons. *Mol Pain* 2006;2(12). DOI: 10.1186/1744-8069-2-12
2. Mohammadshirazi A., Apicella R., Zylberberg B. et al. Suprapontine structures modulate brainstem and spinal networks. *Cell Mol Neurobiol* 2023;43:2831–56. DOI: 10.1007/s10571-023-01321-z
3. Fishera M. Electrophysiology of radiculopathies. *Clin Neurophysiol* 2002;113(3):317–35. DOI: 10.1016/s1388-2457(02)00018-4
4. Nonaka T., Honmou O., Sakai J. et al. Excitability changes of dorsal root axons following nerve injury: Implications for injury-induced changes in axonal Na^+ channels. *Brain Res* 2000;859(2): 280–5. DOI: 10.1016/s0006-8993(00)01979-x
5. Graggen W., Lin C., Howard R. et al. Nerve excitability changes in critical illness. *Polyneuropathy*. *Brain* 2006;129:2461–70. DOI: 10.1093/brain/awl191
6. Schneider U., Niedermeier W., Grafe P. et al. The paradox between resistance to hypoxia and liability to hypoxic damage in hyperglycemic peripheral nerves. Evidence for glycolysis involvement. *Diabetes* 1993;42(7):981–7. DOI: 10.2337/diab.42.7.981
7. Barker A.T., Jalinos R., Freeston I.L. Non-invasive magnetic stimulation of human motor cortex. *Lancet* 1985;1(8437):1106–7. DOI: 10.1016/s0140-6736(85)92413-4
8. Rossini P.M., Burke D., Chen R. et al. Non-invasive electrical and magnetic stimulation of the brain, spinal cord, roots

- and peripheral nerves: Basic principles and procedures for routine clinical and research application. An updated report from an I.F.C.N. Committee. *Clin Neurophysiol* 2015;126(6):1071–107. DOI: 10.1016/j.clinph.2015.02.001
9. Никитин С.С., Куренков А.Л. Магнитная стимуляция в диагностике и лечении болезней нервной системы. М.: Сашко, 2003. Nikitin S.S., Kurenkov A.L. Magnetic stimulation in diagnosis and treatment of nerves system diseases. Moscow: Sashko, 2003. (In Russ.).
 10. Каньшина Д.С., Мельников И.А., Ублинский М.В. и др. Клинический случай реорганизации кортикоспинального тракта дополнительной моторной зоны при постгипоксическом поражении центральной нервной системы у ребенка. *Анналы клинической и экспериментальной неврологии* 2023;17(4):97–101. DOI: 10.54101/ACEN.2023.4.12
Kanshina D.S., Melnikov I.A., Ublinskiy M.V. et al. A clinical case of corticospinal tract reorganization of supplementary motor area in a child after acute hypoxic brain injury. *Annaly klinicheskoy eksperimentalnoy nevrologii* = *Annals of Clinical and Experimental Neurology* 2023;17(4):97–101. (In Russ.). DOI: 10.54101/ACEN.2023.4.12
 11. Каньшина Д.С., Ублинский М.В., Мельников И.А. и др. Реорганизация кортикоспинального тракта при postanoxических состояниях у детей: серия клинических наблюдений. *Русский медицинский журнал. Мать и дитя* 2024;7(3):286–92. DOI: 10.32364/2618-8430-2024-7-3-14
Kanshina D.S., Ublinskiy M.V., Melnikov I.A. et al. Cortico-spinal reorganization in post anoxic conditions in children: a series of case reports. *Russkiy meditsinskiy zhurnal. Mat i ditya* = *Russian Medical Journal. Mother and Child* 2024;7(3):286–92. (In Russ.). DOI: 10.32364/2618-8430-2024-7-3-14.
 12. Rydevik B., Brown M.D., Lundborg G. Pathoanatomy and pathophysiology of nerve root compression. *Spine* 1984;9:7–15. DOI: 10.1097/00007632-198401000-00004
 13. Haldeman S. Low back pain: Current physiologic concepts. *Neurol Clin* 1999;17:1–15. DOI: 10.1016/s0733-8619(05)70111-0
 14. Stodick L.S., Beel J.A., Lutiges M.W. Structural properties of spinal nerve roots: Protein composition. *Exp Neurol* 1986;91:41–51. DOI: 10.1016/0014-4886(86)90024-5
 15. Olmarker K., Rydevik B., Holm S. Edema formation in spinal nerve roots induced by experimental, graded compression. An experimental study on the pig cauda equina with special reference to differences in effects between rapid and slow onset of compression. *Spine* 1989;14:569–73.
 16. Ветош А.Н. Взаимодействие кислородчувствительных механизмов в клетке. *Ульяновский медико-биологический журнал* 2019;(3):52–62. DOI: 10.34014/2227-1848-2019-3-52-62
Vetosh A.N. Interaction of oxygen-sensing mechanisms in cells. *Ulyanovskiy mediko-biologicheskij zhurnal* = *Ulyanovsk Medico-biological Journal* 2019;(3):52–62. (In Russ.). DOI: 10.34014/2227-1848-2019-3-52-62
 17. Matsumoto H., Ugawa Y. Central and peripheral motor conduction studies by single-pulse magnetic stimulation. *J Clin Neurol* 2024;20(3):241–55. DOI: 10.3988/jcn.2023.0520
 18. Tamler M.S., Siegel C.B. Magnetic stimulation: C-8 root standardization based on arm length and arm position. *Muscle Nerve* 1993;16(8):836–39. DOI: 10.1002/mus.880160806
 19. Morris E., Liske S. Ionic mechanisms of action of GABA on dorsal and ventral root myelinated fibers: effects of K⁺ channel blockers. *Can J Physiol Pharmacol* 1989;67(10):1308–14. DOI: 10.1139/y89-208

Вклад авторов

Д.С. Каньшина: разработка дизайна работы, обработка и анализ полученных данных, обзор публикаций по теме статьи, написание статьи;
Т.А. Ахадов: разработка дизайна работы, анализ полученных данных;
В.П. Зыков: разработка дизайна работы;
С.С. Никитин: анализ полученных данных, написание статьи.

Authors' contributions

D.S. Kanshina: development of the design of the work, processing and analysis of the obtained data, review of publications on the topic of the article, writing the article;
T.A. Akhadov: development of the design of the work, analysis of the obtained data;
V.P. Zykov: development of the design of the work;
S.S. Nikitin: analysis of the obtained data, writing the article.

ORCID авторов / ORCID of authors

Д.С. Каньшина / D.S. Kanshina: <https://orcid.org/0000-0002-5142-9400>
Т.А. Ахадов / T.A. Akhadov: <https://orcid.org/0000-0002-3235-8854>
В.П. Зыков / V.P. Zykov: <https://orcid.org/0000-0002-1401-5479>
С.С. Никитин / S.S. Nikitin: <http://orcid.org/0000-0003-3292-2758>

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Финансирование. Работа выполнена без спонсорской поддержки.

Funding. The work was performed without external funding.

Соблюдение прав пациентов и правил биоэтики. Исследование одобрено локальным этическим комитетом ГБУЗ «Научно-исследовательский институт неотложной детской хирургии и травматологии — Клиника доктора Рошала» Департамента здравоохранения г. Москвы (протокол № 23 от 28.09.2023). Родители пациентки подписали информированное согласие на публикацию ее данных.

Compliance with patient rights and principles of bioethics. The study was approved by the local ethics committee of the Institute of Emergency Pediatric Surgery and Trauma — Dr. Roshal's Clinic, Moscow Healthcare Department (protocol No. 23 dated September 28, 2023). The patient's parents signed informed consent for the publication of her data.

Статья поступила: 04.06.2025. **Принята к публикации:** 12.07.2025. **Опубликована онлайн:** 19.09.2025.

Article submitted: 04.06.2025. **Accepted for publication:** 12.07.2025. **Published online:** 19.09.2025.