

УДК 616.711-089-053.2

DOI: <https://doi.org/10.17816/PTORS61946>

Особенности использования интраоперационного нейрофизиологического мониторинга при дорсальной резекции полупозвонков

© С.В. Виссарионов¹, А.Р. Сюддюков², Н.С. Николаев^{2, 3}, В.А. Кузьмина², П.Н. Корняков², М.Н. Максимов², И.В. Михайлова³

¹ Национальный медицинский исследовательский центр детской травматологии и ортопедии имени Г.И. Турнера, Санкт-Петербург, Россия;

² Федеральный центр травматологии, ортопедии и эндопротезирования, Чебоксары, Россия;

³ Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, Чебоксары, Россия

Обоснование. Врожденные нарушения формирования позвонков — частая патология у детей. Интраоперационный нейрофизиологический мониторинг является обязательной процедурой, которая может быть недостаточно эффективной из-за незрелости невралных структур, применения ингаляционных анестетиков у детей раннего возраста.

Цель — изучить особенности проведения интраоперационного нейрофизиологического мониторинга у детей с врожденной деформацией позвоночника при дорсальной резекции полупозвонков.

Материалы и методы. 42 пациентам в возрасте 1–17 лет с врожденной деформацией позвоночника проведено 46 резекций аномального позвонка из изолированного дорсального доступа (методика egg-shell). Интраоперационный нейрофизиологический мониторинг на этапах операции включал тест на миорелаксанты (TOF), транскраниальную электрическую стимуляцию моторной коры (ТСеМЕР), контроль приближения к нерву (N. Proxu) и правильности установки транспедикулярного винта (Screw Integrity), ЭМГ-запись электромиограммы. Корректность проведения винтов оценивали по методике Gerzbien, наличие неврологических нарушений — по шкале Frenkel. Регулируя подачу ингаляционного анестетика (севоран), контролировали его влияние на моторные вызванные потенциалы и выявляли их зависимость от возраста пациентов.

Результаты. Средний возраст пациентов — $7,7 \pm 4,5$ года. Значение TOF — $80,5 \pm 17$ %. У 41 пациента тест N. Proxu — без особенностей, у 1 — значение 8–12 мА не потребовало изменения траектории проведения винтов. С начала подачи севорана и интраоперационно моторные вызванные потенциалы со всех тестируемых мышц зарегистрированы у 54,8 % пациентов, у детей старше 8 лет — в 92,8 % случаев, у детей младше 8 лет — в 35,7 % случаев в своих возрастных группах. У остальных пациентов на фоне подачи севорана моторные вызванные потенциалы чаще всего отсутствовали с мышц бедра и голени: у детей старше 8 лет в 7,2 % случаев, младше 8 лет — у 83,3 % пациентов; у 7,2 % пациентов до 8 лет изначально моторные вызванные потенциалы не регистрировались ни с одной мышцы. Таким образом, мы не могли адекватно оценить проведение по двигательным путям у 19 пациентов (45,2 %), у 13 из них (30,9 %) отмена севорана позволила получить моторные вызванные потенциалы интраоперационно со всех тестируемых мышц в 100 % случаев. Для адекватного ведения анестезиологического пособия 5 (50 %) пациентам 1–4 лет и 1 пациенту 6 лет (5,6 %) севоран не отменяли, и моторные вызванные потенциалы регистрировали с мышц живота, что позволяло оценить проведение только на грудном уровне и требовало повышенной осторожности хирургов при корригирующих манипуляциях.

Заключение. Интраоперационный нейрофизиологический мониторинг при дорсальной резекции полупозвонка обоснован, эффективен, позволяет контролировать неврологические осложнения в ходе манипуляций на позвоночнике.

Ключевые слова: дорсальная резекция полупозвонков; нейрофизиологический мониторинг; интраоперационный нейромониторинг; моторные вызванные потенциалы; полупозвонок; транскраниальная электрическая стимуляция моторной коры; севоран; egg-shell; Screw Integrity; N. Proxu.

Как цитировать:

Виссарионов С.В., Сюддюков А.Р., Николаев Н.С., Кузьмина В.А., Корняков П.Н., Максимов М.Н., Михайлова И.В. Особенности использования интраоперационного нейрофизиологического мониторинга при дорсальной резекции полупозвонков // Ортопедия, травматология и восстановительная хирургия детского возраста. 2021. Т. 9. № 3. С. 267–276. DOI: <https://doi.org/10.17816/PTORS61946>

DOI: <https://doi.org/10.17816/PTORS61946>

The use of intraoperative neurophysiological monitoring in dorsal resection of hemivertebrae

© Sergei V. Vissarionov¹, Ayrat R. Syundyukov², Nikolay S. Nikolaev^{2, 3}, Valentina A. Kuzmina², Pavel N. Korniyakov², Maxim N. Maksimov², Irina V. Mikhailova³

¹ H. Turner National Medical Research Center for Children's Orthopedics and Trauma Surgery, Saint Petersburg, Russia;

² Federal Center for Traumatology, Orthopedics and Arthroplasty, Cheboksary, Russia;

³ Chuvash State University named after I.N. Ulyanov, Cheboksary, Russia

BACKGROUND: Congenital disorders of vertebrae formation are a common pathology in children. Intraoperative neurophysiological monitoring is a mandatory procedure, although it may not be effective enough due to the immature neural structures and the use of inhalation anesthetics in young children.

AIM: To study aims to investigate the characteristic features of intraoperative neurophysiological monitoring in children with a congenital deformity of the spine during dorsal resection of the hemivertebrae.

MATERIALS AND METHODS: 42 patients aged 1–17 years with a congenital deformity of the spine underwent 46 resections of the abnormal vertebra from an isolated dorsal approach (egg-shell technique). Intraoperative neurophysiological monitoring at the stages of the operation included a muscle relaxant test (TOF), transcranial electrical stimulation of the motor cortex (TCeMEP), control of the approach to the nerve (N. Proxy), correct placement of the pedicle screw (Screw Integrity), and EMG recording of the electromyogram. The accuracy of the screw placement was assessed by the Gerzbien method, and the presence of neurological disorders was tested by the Frenkel scale. The effect of inhalation anesthetic (sevoran) on motor evoked potentials was monitored by regulating its delivery, and the dependence on the age of patients was evaluated.

RESULTS: The average age of patients was 7.7 ± 4.5 years, and the TOF value was $80.5 \pm 17\%$. In 41 patients, the N. Proxy test was unremarkable, while in one patient, the 8–12 mA value did not require a change in the trajectory of the screws. From the beginning of sevoran and intraoperatively, motor evoked potentials from all tested muscles were recorded in 54.8% of patients; in children over 8 years old, this was observed in 92.8%, in children under 8 years old — in 35.7% of cases in their age groups. In other patients, motor evoked potentials were most often not recorded from the muscles of the thigh and lower leg after sevoran administration. In children over 8 years old in 7.2%, under 8 years old — in 83.3% of patients; Interestingly, in 7.2% of patients who are under 8 years of age, motor evoked potentials were not initially recorded from any muscle. Withdrawal of sevorane in 30.9% of patients allowed intraoperative motor evoked potentials to be obtained from all tested muscles in 100% of cases. For adequate management of anesthesia, 5 patients (50%) 1–4 years old and one patient 6 years old (5.6%) did not receive sevoran, and motor evoked potentials were recorded from the abdominal muscles. This allowed to assess the conduction only at the thoracic level and are required increased vigilance of surgeons when carrying out any corrective manipulations.

CONCLUSIONS: Intraoperative neurophysiological monitoring with dorsal hemivertebra resection is an effective method that allows controlling the neurological complications during manipulations on the spine.

Keywords: dorsal hemivertebra resection; neurophysiological monitoring; dorsal resection; motor potential potentials; hemivertebra; electrical stimulation; sevoflurane; egg-shell; Screw Integrity; N. Proxy.

To cite this article:

Vissarionov SV, Syundyukov AR, Nikolaev NS, Kuzmina VA, Korniyakov PN, Maksimov MN, Mikhailova IV. The use of intraoperative neurophysiological monitoring in dorsal resection of hemivertebrae. *Pediatric Traumatology, Orthopaedics and Reconstructive Surgery*. 2021;9(3):267–276. DOI: <https://doi.org/10.17816/PTORS61946>

Received: 26.02.2021

Accepted: 31.08.2021

Published: 30.09.2021

ОБОСНОВАНИЕ

Врожденные нарушения формирования позвонков — наиболее часто встречающаяся патология позвоночного столба детского возраста. Значительную долю этих пороков представляют изолированные заднебоковые или боковые полупозвонки, приводящие к развитию грубых ригидных искривлений [1, 2]. Методом лечения данного заболевания является раннее хирургическое вмешательство: резекция полупозвонка с полноценной коррекцией врожденной деформации и стабилизацией минимального количества позвоночно-двигательных сегментов спинальной металлоконструкцией [3, 4]. В последнее время получила распространение методика удаления аномального позвонка из дорсального доступа [5]. Однако при этой манипуляции возможно развитие неврологических осложнений, которые могут быть обусловлены не только прямым механическим повреждением, растяжением или компрессией нервных структур, но и нарушением кровоснабжения спинного мозга [6–11]. Применение интраоперационного нейромониторирования (ИОНМ) позволяет предотвратить подобные ситуации, предоставляя оперирующему врачу возможность проводить постоянное наблюдение за функциональным состоянием структур центральной нервной системы, диагностировать механическое или ишемическое повреждение нервной ткани, возникшее в ходе оперативного вмешательства, и избежать послеоперационных осложнений [12, 13]. В настоящее время ИОНМ становится мировым стандартом контроля неврологических осложнений при хирургических вмешательствах, в ходе которых могут быть затронуты нервные структуры [14], однако применение ИОНМ в детской практике имеет свои особенности и недостаточно изучено. Учитывая незрелость невральных структур у пациентов в раннем детском возрасте, по данным источников, эффективность применения нейрофизиологического мониторинга может быть низкой. Транскраниальная магнитная стимуляция показала, что функциональные характеристики моторных путей начинают полностью соответствовать параметрам взрослого человека только в 12–14 лет. Миелинизация кортико-спинального тракта заканчивается только в подростковом возрасте, причем миелинизация путей к мышцам нижних конечностей завершается в 11–12 лет, а к мышцам верхних конечностей — в 12–17 лет. Окончательное созревание центрального отдела двигательного пути завершается только во втором десятилетии жизни [15, 16]. Применение ингаляционных анестетиков может негативно влиять на получение моторных ответов в процессе проведения нейромониторинга и не обеспечивать адекватного контроля за возможностью возникновения неврологических нарушений в ходе оперативного вмешательства [9]. Для получения достоверных данных и исключения ложноотрицательных результатов

исследования необходимо учитывать депрессорный эффект анестетиков на параметры вызванной активности [17–20]. Известно, что ингаляционные анестетики в высоких дозах вызывают депрессию синаптической передачи импульсов, на фоне которой изменяются амплитудно-временные характеристики вызванных потенциалов: снижается амплитуда и увеличивается латентный период [12]. Амплитуда вызванного моторного ответа при этом не имеет практического значения, поскольку зависит от многих факторов, в первую очередь от индивидуальной проводимости нервных волокон. Значимыми являются только наличие ответа и факт снижения амплитуды во время операции по сравнению с исходным значением [10, 12]. В доступной литературе недостаточно данных о применении интраоперационного нейромониторинга у детей. При дорсальной резекции полупозвонков оценка эффективности ИОНМ наиболее важна по причине использования данного метода хирургического лечения именно в детском возрасте.

Цель — изучить особенности проведения ИОНМ у детей с врожденной деформацией позвоночника при дорсальной резекции полупозвонков.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В ФГБУ «Федеральный центр травматологии, ортопедии и эндопротезирования» Минздрава России (г. Чебоксары) проведено ретроспективное одноцентровое сплошное исследование базы данных пациентов одного хирурга, прооперированных по поводу врожденной деформации позвоночника. С 2013 по 2019 г. общее число операций составило 75, часть из них исключена из группы наблюдения в соответствии с критериями отбора.

Критерии включения в исследование: наличие полупозвонка (-ов); операция из дорсального доступа; фиксация не более двух позвоночно-двигательных сегментов; отсутствие первичного неврологического дефицита.

Критерии исключения из исследования: комбинированные пороки развития; протяженная фиксация более 4 уровней.

В исследование были включены 42 ребенка (26 девочек и 16 мальчиков) в возрасте от 1 до 17 лет с врожденными деформациями позвоночника. Пациенты разделены на возрастные группы: в 1-ю группу вошли 9 детей в возрасте от 1 до 4 лет, во 2-ю — 18 детей от 5 до 8 лет, в 3-ю — 8 детей от 9 до 13 лет, в 4-ю — 7 детей от 14 до 17 лет. Данная система ранжирования избрана как наиболее удобная для анализа с позиций соответствия задачам исследования.

Средний возраст пациентов составил $7,7 \pm 4,5$ года. Аномальные позвонки были локализованы в поясничном (26 случаев; 61,9 %) и грудном (16 случаев; 38,1 %) отделах. Правостороннее расположение полупозвонков отмечалось у 20 (47,6 %) пациентов,

левостороннее — у 22 (52,4 %). Сегментированные полупозвонки встречались в 22 случаях (52,4 %), полусегментированные — в 16 (38,1 %), несегментированные — в 4 (9,5 %).

Всем пациентам проведена резекция одного или нескольких аномальных позвонков из дорсального доступа с коррекцией врожденного искривления и стабилизацией достигнутого результата многоопорной металлоконструкцией. В ходе операции после разреза кожи обнажали дорсальные отделы позвоночника в зоне вмешательства. Далее устанавливали транспедикулярные винты в смежные позвонки относительно аномального позвонка (-ов), в зависимости от характера деформации при необходимости фиксацию продлевали выше или ниже на 1 или 2 сегмента, после чего выполняли резекцию ребра (ребер) аномального позвонка (-ов), если процедура проводилась на грудном уровне. Затем резецировали дорсальные структуры полупозвонка (-ов) и визуализировали корень дуги (дуг) порочного позвонка. После этого осуществляли деканцеляцию через корень дуги (дуг) по методике egg-shell («яичной скорлупы»), затем резецировали наружную и дорсальную скорлупу позвонка, после чего в зависимости от выбранного типа резекции по Bollini [21] удаляли замыкательные пластинки и осуществляли дискэктомию с установкой межтелового имплантата (аутокости). Завершали вмешательство погружением стержней в головки винтов и проведением корригирующих манипуляций по вогнутой и выпуклой сторонам искривления. Финальным этапом послойно ушивали операционную рану.

В среднем протяженность фиксации составила $3,2 \pm 1,1$ сегмента. Один сегмент был фиксирован в 11 случаях (фиксация ограничивалась двумя позвонками, смежными с удаляемым полупозвонком). Два сегмента фиксировали в 15 случаях, то есть инструментировали два позвонка, смежных с удаляемым, и еще один позвонок — краниальнее или каудальнее, в зависимости от сколиотической деформации. Три сегмента фиксировали в 16 случаях по тому же принципу. Количество фиксирующих элементов в среднем составило $5,8 \pm 2,3$ винта.

Применяли комбинированную эндотрахеальную анестезию. Интубацию осуществляли оротрахеальным методом после внутривенного введения миорелаксанта суксаметония хлорида. После интубации больных переводили на искусственную вентиляцию легких. Для поддерживающей анестезии использовали фентанил, пропופол, севоран в максимальной альвеолярной концентрации 0,3–2 %.

Операции проводились под контролем ИОНМ с применением системы NIM — Eclipse System (Medtronic, США). Методика включала пять тестов.

1. Тест на миорелаксанты (TOF) выполняли для изменения степени нервно-мышечной блокады, что позволяло исключить ложноотрицательные результаты,

обусловленные эффектами паралитических средств. Мониторинг нервно-мышечной блокады осуществляли с момента введения миорелаксантов до достижения нормальных значений (более 60 %) путем стимуляции соответствующего нерва и регистрации вызванного суммарного моторного потенциала в иннервируемой им мышце.

2. Транскраниальную электрическую стимуляцию моторной коры (TcMEP) с регистрацией моторных вызванных потенциалов (МВП) использовали для оценки функционального состояния моторных кортико-спинальных трактов. МВП регистрировали в ключевых мышцах, соответствующих оперируемому уровню. Для получения МВП стимулирующие электроды устанавливали под кожу волосистой части головы по линии, отстоящей на ширину одного пальца вперед (по направлению к носу) от точек C_3 и C_4 и соответствующей проекции моторной зоны коры. Регистрирующие электроды всем пациентам устанавливали в прямую мышцу живота (T_5-T_{11}), косую мышцу живота ($T_{12}-L_1$), латеральную головку четырехглавой мышцы бедра (L_2-L_4), переднюю большеберцовую (L_4-L_5, S_1) или длинную малоберцовую мышцы (L_5-S_1). Особенностью пациентов детского возраста являлись небольшие размеры мышц, что требовало точности при установке игольчатых электродов. Первое исследование проводили до начала операции, после введения ребенка в наркоз с применением севорана. Затем МВП оценивали на этапе установки винтов наряду с тестом N. Proxu и далее — многократно при корригирующих маневрах хирурга, представляющих потенциальную угрозу повреждения невралных структур. При этом учитывали наличие или отсутствие моторного ответа (критерий «да – нет») независимо от его величины с мышц живота и нижних конечностей, а также снижение амплитуды МВП более 70 % исходной. У маленьких детей с трудно получаемыми ответами дозирование севорана в связи с его депрессивным влиянием на МВП анестезиологи проводили в ручном режиме. В тех случаях когда МВП с мышц нижних конечностей не регистрировались, на этапе удаления полупозвонка и корригирующих воздействий приходилось отключать севоран полностью с временной поддержкой наркотическими анальгетиками и пропופолом до момента появления потенциалов, свидетельствующих о сохранности кортико-спинального тракта, после чего подачу севорана возобновляли.
3. Режим контроля приближения к нерву (N. Proxu) позволял отслеживать корректное формирование канала для транспедикулярного винта. На инструменте хирурга фиксировали петлю, на которую подавали электрический стимул силой тока от 1 до 12 мА. При корректном проведении инструмента через дугу позвонка на мониторе прибора появлялась изолиния.

По мере приближения проводника к невральным структурам появлялись электромиографические (ЭМГ) ответы нарастающей амплитуды на минимальную силу стимула. В таком случае хирург менял траекторию продвижения инструмента до исчезновения ЭМГ-ответа.

4. Правильность установки транспедикулярного винта во время фиксации позвоночника контролировали с помощью пуговчатого зонда, на который подавали электрический стимул (режим Screw Integrity). О корректной установке винта строго в педикуле и отсутствии дефектов стенок транспедикулярного канала свидетельствовало отсутствие ЭМГ-ответа либо его появление на стимул высокой мощности. Наличие ЭМГ-ответа расценивали как близость к невральным структурам, обусловленную дефицитом костной ткани в педикуле. Чаше подобная ситуация отмечалась на вершине деформации по вогнутой стороне и объяснялась анатомо-морфологическими особенностями позвонков в этой зоне. При регистрации стойкого высокоамплитудного ЭМГ-ответа положение винта контролировали с помощью электронно-оптического преобразователя. При некорректном положении винта его убрали, если он не нес стратегической нагрузки, или меняли траекторию проведения, в некоторых случаях транспедикулярный винт заменяли на другой фиксирующий элемент (крюк, лента).
5. ЭМГ-запись электромиограммы. При регистрации ЭМГ-ответа, свидетельствующего о приближении к невральным структурам, хирург менял траекторию продвижения инструмента.

По данным послеоперационной компьютерной томографии (КТ) оценивали протяженность инструментальной фиксации, корректность проведения транспедикулярных опорных элементов. Фиксировали изменения параметров ИОНМ в ходе операции. При оценке корректности проведения транспедикулярных винтов использовали методику Gerzbien. Учитывали отклонение винта в сторону спинального канала как потенциально опасное в плане возникновения неврологических нарушений, а также отклонение винтов латеральнее педикулы как фактор риска получения радикулярной симптоматики. Выход винтов за пределы тела позвонка по передней поверхности не учитывали, так как в некоторых случаях специально использовали бикортикальное проведение для более надежной фиксации. Наличие/отсутствие неврологических нарушений оценивали по шкале Frenkel.

Статистическую обработку полученных данных проводили с помощью программ Microsoft Excel 2007 (Microsoft Inc., США) и GraphPad (GraphPad Software, США). Соответствие значений выборки нормальному распределению в MS Excel подтверждали графическим методом, что позволило отражать результаты в виде средней арифметической (M) и стандартного отклонения (SD). Для оценки статистической значимости различий сред-

них значений в группах использовали парный t -критерий Стьюдента, точный тест Фишера. Статистически значимыми считали различия при значениях $p < 0,05$.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Все винты были проведены корректно у 26 (61,9 %) пациентов; у 16 (38,1 %) пациентов один или несколько винтов были проведены некорректно. Из 243 винтов, установленных у 42 пациентов, положение 222 расценено как абсолютно корректное. При этом 21 винт у 16 пациентов имел следующие отклонения: в сторону канала — 6 (28,6 % отклонившихся винтов и 2,5 % всех установленных), в латеральную сторону — 15 винтов (71,4 % некорректно установленных и 6,2 % всех установленных) (рис. 1).

Отклонений винтов выше или ниже педикулы в сторону фораминального отверстия не отмечалось. Значение TOF у всех пациентов было более 60 %, что свидетельствовало об отсутствии влияния миорелаксантов на показатели работы ИОНМ. Согласно протоколам ИОНМ и оценке значений теста N. Proxu, 41 пациент прошел тест без особенностей, то есть прямого контакта с невральными структурами не отмечено. У 1 пациента на уровне L₁ справа тест показал значение 8–12 Ма, что считается допустимым и не требует изменения траектории проведения винта. По данным послеоперационной КТ у этого пациента было выявлено не критичное смещение винта в сторону позвоночного канала. У остальных пациентов с некорректным положением винтов интраоперационно при проведении теста N. Proxu не обнаружено признаков компрессии и прямого контакта с невральными структурами.

С момента введения ребенка в наркоз записывали исходные данные МВП (base line), в дальнейшем производили динамическую оценку этого теста на протяжении всего оперативного вмешательства. Средний возраст пациентов с положительным ответом на стимуляцию



Рис. 1. Результаты проведения винтов

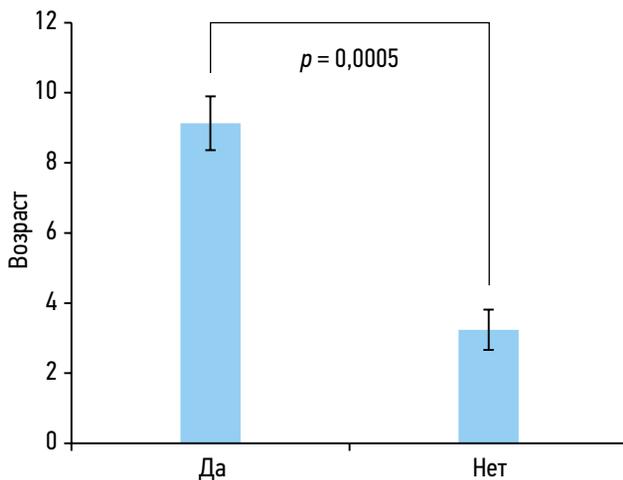


Рис. 2. Зависимость наличия/отсутствия исходных моторных вызванных потенциалов от среднего возраста

составил $9,1 \pm 0,8$ года и был статистически достоверно выше ($p = 0,0005$) по сравнению с группой, где не был получен ответ ($3,3 \pm 0,4$ года). Оценивая влияние возраста на получение моторного ответа, мы выявили статистически достоверную зависимость, то есть чем меньше возраст пациента, тем реже нам удавалось получать моторные ответы (рис. 2).

В начале операции, до проведения хирургических манипуляций, у всех пациентов 9–13 лет и 5 (83,3 %) пациентов 14–17 лет исходно и в ходе операции регистрировали МВП с прямой и косой мышц живота, а также с мышц бедра и голени.

Регистрировали МВП с прямой и косой мышц живота и мышц бедра и голени у 7 (38,9 %) детей 5–8 лет и только у 3 (30 %) из 10 детей до 4 лет. Вероятно, это связано с возрастными особенностями созревания кортико-спинального тракта и влиянием севорана (см. таблицу).

При введении в наркоз не были получены моторные ответы с мышц нижних конечностей у 7 (70 %) пациентов 1–4 лет, 11 (61,1 %) пациентов 5–8 лет и 1 пациента (16,7 %) 15 лет. При этом ни с одной из тестируемых

мышц не регистрировали МВП у 1 (10 %) пациента 3 лет и 2 (11,1 %) пациентов 5–8 лет. Таким образом, мы не получили желаемого результата у 18 пациентов до 8 лет и 1 пациента 14–17 лет. Отмена севорана у 12 пациентов 1–8 лет, у которых моторные ответы на фоне севорана отсутствовали, позволила получить потенциалы с мышц живота и голени во всех случаях. У 6 пациентов МВП регистрировали только с мышц живота (5 детей 1–4 лет и 1 ребенок 6 лет) — у них севоран не отменяли для адекватного ведения анестезиологического пособия. Это позволяло оценить проведение только на грудном уровне, что требовало повышенной осторожности хирургов при выполнении корректирующих манипуляций. У единственного пациента 15 лет с отсутствующими ответами на фоне севорана после его отмены они также восстановились, что свидетельствовало о сохранности двигательных путей.

Таким образом, у 23 (54,8 %) пациентов регистрировали МВП исходно и интраоперационно со всех тестируемых уровней, при этом среди детей старше 8 лет — в 92,9 % случаев, а у детей моложе 8 лет — в 35,7 % случаев ($p = 0,0007$). У остальных пациентов на фоне подачи севорана МВП с отдельных групп мышц не регистрировали. Чаще всего у этих пациентов отсутствовали МВП с мышц бедра и голени: у детей старше 8 лет — в 7,1 % случаев, моложе 8 лет — у 64,3 % пациентов ($p = 0,0058$). У 3 (10,7 %) пациентов до 8 лет исходно МВП не регистрировались ни с одной мышцей, однако исключение депрессорного эффекта севорана позволило получить моторные ответы со всех уровней. Всего в ходе операции МВП со всех уровней были зарегистрированы у 36 (85,7 %) пациентов, что свидетельствовало о целостности двигательных путей.

Кратковременное снижение амплитуды МВП более 70 % с мышц ног при коррекционных манипуляциях было зафиксировано у 1 пациента группы 9–13 лет с последующим восстановлением до исходного уровня на фоне ослабления конструкции, введения глюкокортикоидов и орошения раны теплым изотоническим раствором натрия хлорида.

Таблица. Регистрация моторных вызванных потенциалов на фоне севорана

Наличие моторных вызванных потенциалов на фоне севорана	Возраст, годы								Всего, абс. число ($n = 42$)	Всего, уд. вес, %
	1–4 ($n = 10$)		5–8 ($n = 18$)		9–13 ($n = 8$)		14–17 ($n = 6$)			
	абс. число	уд. вес, %	абс. число	уд. вес, %	абс. число	уд. вес, %	абс. число	уд. вес, %		
Есть ответ с мышц живота и ног (уровень с Th ₆ по L ₅ –S ₁)	3	30	7	38,9	8	100	5	83,3	23	54,8
Есть ответ с мышц живота (уровень Th ₆ –Th ₁₂)	6	60	9	50	–	–	1	16,7	16	38
Нет ответа	1	10	2	11,1	–	–	–	–	3	7,2

Наряду с оценкой МВП использовали и другие тесты ИОНМ. На этапе формирования канала для транспедикулярного винта проводили тест N. Proxu, а правильность установки винтов проверяли с помощью теста Screw Integrity. Результаты данных тестов не зависели от возраста и дозы севорана. При регистрации ЭМГ-ответа, свидетельствующего о приближении к невральным структурам, хирург менял траекторию продвижения инструмента. Благодаря этому не было зарегистрировано ни одного неврологического осложнения, хотя по данным послеоперационного КТ-контроля из 243 установленных винтов было зафиксировано незначительное отклонение 6 винтов в сторону спинномозгового канала и 15 — латерально.

ОБСУЖДЕНИЕ

Использование ИОНМ при проведении данного вмешательства объясняется необходимостью безопасной резекции полупозвонка. Поскольку дорсальная резекция осуществляется под дуральным мешком и рядом с местом выхода корешка, существует риск повреждения инструментом невральных структур.

Оперативные вмешательства на спинном мозге и позвоночнике влекут за собой достаточно высокий риск развития послеоперационных осложнений. К наиболее тяжелым из них относится развитие стойкого неврологического дефицита в форме параличей и нарушений функции тазовых органов [22]. Дорсальная резекция врожденных полупозвонков также сопряжена с риском возникновения неврологических осложнений вследствие повреждения инструментом невральных структур. ИОНМ доказал свою эффективность и постепенно становится неотъемлемым условием современной спинальной хирургии, позволяя предупреждать возникновение тяжелых послеоперационных неврологических осложнений. Перспективы развития этого метода связаны с уточнением показаний к нему и оптимальных параметров стимуляции, с разработкой неинвазивных способов интраоперационной транскраниальной стимуляции у пациентов, находящихся в условиях анестезии [22]. Общие принципы мониторинга в операционной суммированы в работах J.M. Guerit: «Между хирургом, анестезиологом и нейрофизиологом должно быть достигнуто открытое соглашение, по которому использование мониторинговых методик не должно сопровождаться риском повреждения мозговых структур; хирург согласен ожидать момента завершения нейрофизиологических исследований с тем, чтобы соотнести свои действия с результатами мониторинга; анестезиолог соглашается адаптировать свою технику к регистрации МВП и постоянно держать нейрофизиолога в курсе параметров пациента» [22].

Согласно современным руководствам, операцию на спинном мозге необходимо проводить под кон-

тролем как сомато-сенсорных вызванных потенциалов (ССВП), так и мышечных вызванных потенциалов, индуцированных транскраниальной электрической стимуляцией, на протяжении всей операции. Многочисленные исследования подтвердили более ранние сообщения о том, что ССВП-мониторинг способен обеспечить адекватный электрофизиологический контроль только чувствительных трактов спинного мозга. Нормальные значения параметров ССВП во время оперативного вмешательства не гарантируют отсутствия моторного неврологического дефицита в послеоперационном периоде [12].

Методика ИОНМ подробно изложена в специальных руководствах, однако применению ИОНМ в детской практике уделено меньше внимания. Описано проведение операций на позвоночнике у детей старше 12 лет под контролем ССВП и wake-up test [23]. При выполнении ИОНМ рекомендуют воздержаться от использования ингаляционных анестетиков, но в детской анестезиологии часто используют севоран, который оказывает депрессорный эффект на параметры вызванной активности. При отсутствии МВП рекомендовано приостановить хирургические манипуляции и предпринять корректирующие меры для восстановления МВП [24]. В этом случае пациентам проводили тест пробуждения (Stagnara test), выявляющий движения в конечностях, после чего пациентов переводили на комбинированный наркоз, при этом были получены сенсорные и моторные вызванные потенциалы [13].

Для осуществления безопасных хирургических манипуляций необходимо мониторировать МВП на всех уровнях двигательного тракта. Их отсутствие с мышц ног может быть связано как с влиянием севорана, так и с действиями хирурга по удалению полупозвонка и при корректирующих маневрах. Когда риск повреждения двигательного тракта наиболее высок, приходится отключать севоран полностью, с временной поддержкой большими дозами наркотиков и пропофола, до момента появления потенциалов, свидетельствующих о сохранности кортико-спинального тракта, после чего подачу севорана возобновляют.

Если восстановления МВП не происходит, операцию следует завершить, так как очень высок риск, что у пациента разовьется тяжелый двигательный дефицит [24]. При введении в наркоз мы не получили моторные ответы с мышц нижних конечностей у 19 пациентов, однако отмена севорана позволила зарегистрировать МВП у 13 из них. Остальным 6 пациентам 1–6 лет севоран не отменяли, отсутствие МВП с мышцами мишеней объяснялось, по-видимому, депрессорным действием последнего и незрелостью кортико-спинального тракта у детей. Появления моторного дефицита не зафиксировано.

Признана целесообразность проведения теста N. Proxu [22]. Данный тест использовали для оценки

корректного положения транспедикулярных винтов и контроля их приближения к нервным структурам с целью предупреждения развития сегментарных неврологических осложнений. Звуковые и визуальные сигналы монитора, предупреждающие о близком расположении нервных структур, позволили избежать их ятрогенного повреждения. Лишь 2,5 % винтов были отклонены в сторону канала, и ни один из них не вызвал неврологической симптоматики в послеоперационном периоде.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

МВП как важный тест контроля возникновения неврологических осложнений регистрировали со всех тестируемых мышц в момент основного этапа хирургического вмешательства у 85,7 % пациентов. У 6 пациентов (14,3 %) МВП получены только с мышц живота, что требовало повышенного внимания хирурга.

Выявлена статистически значимая ($p = 0,0005$) зависимость исходного ответа на электрическую стимуляцию моторной коры от возраста. Средний возраст пациентов с положительным ответом на стимуляцию был статистически достоверно выше ($p = 0,0005$) по сравнению с группой, в которой ответ отсутствовал.

Для получения достоверной информации о функционировании моторных трактов у детей младшего возраста необходима регистрация МВП на фоне временного отключения ингаляции анестетика. В ситуациях, при которых отмена севорана невозможна, требуется повышенная настороженность хирургов при выполнении манипуляций с целью профилактики неврологических осложнений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ульрих Э.В. Аномалии позвоночника у детей: Руководство для врачей. Санкт-Петербург: Сотис, 1995.
2. Удалова И.Г., Михайловский М.В. Неврологические осложнения в хирургии сколиоза // Хирургия позвоночника. 2013. Т. 3. С. 38–43. DOI: 10.14531/ss2013.3.38-43
3. Crostelli M., Mazza O., Mariani M. Posterior approach lumbar and thoracolumbar hemivertebra resection in congenital scoliosis in children under 10 years of age: results with 3 years mean follow up // Eur. Spine. J. 2014. Vol. 23. No. 1. P. 209–215. DOI: 10.1007/s00586-013-2933-z
4. Klemme W.R., Polly D.W. Jr, Orchowski J.R. Hemivertebral excision for congenital scoliosis in very young children // J. Pediatr. Orthop. 2001. Vol. 21. No. 6. P. 761–764.
5. Виссарионов С.В., Сяндюков А.Р., Кокушин Д.Н., и др. Сравнительный анализ хирургического лечения детей дошкольного возраста с врожденной деформацией позвоночника при изолированных полупозвонках из комбинированного и дорзального доступов // Ортопедия, травматология и восстановительная хирургия детского возраста. 2019. Т. 7. № 4. С. 5–14. DOI: 10.17816/PTORS745-14

Применение интраоперационного нейрофизиологического мониторинга при проведении резекции полупозвонка из дорзального доступа обосновано и эффективно.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Источник финансирования. Исследование выполнено без использования спонсорских средств и финансового обеспечения.

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

Этическая экспертиза. Протокол исследования рассмотрен Этическим комитетом ФГБУ «ФЦТОЭ» Минздрава России (г. Чебоксары) на заседании Больничного медицинского совета «ФЦТОЭ» Минздрава России (г. Чебоксары). Заключение в протоколе № 2 от 19.02.2021: члены комитета единогласно одобрили проведение клинического исследования и публикацию его результатов.

Авторы получили письменное добровольное согласие пациентов (или их законных представителей) на публикацию медицинских данных.

Вклад авторов. С.В. Виссарионов — идея исследования, контроль на этапах выполнения, редактирование текста статьи. А.Р. Сяндюков — статистическая обработка материала, написание текста статьи. Н.С. Николаев — концепция и дизайн исследования, редактирование текста статьи. В.А. Кузьмина — редактирование текста статьи, подготовка графического материала. П.Н. Корняков — сбор и обработка материала, подготовка графического материала. М.Н. Максимов, И.В. Михайлова — сбор и обработка материала.

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

6. Guo J., Zhang J., Wang S., et al. Surgical outcomes and complications of posterior hemivertebra resection in children younger than 5 years old // J. Orthop. Surg. Res. 2016. Vol. 11. No. 1. P. 48. DOI: 10.1186/s13018-016-0381-2
7. Li J., Lü G.H., Wang B., et al. Pedicle screw implantation in the thoracic and lumbar spine of 1-4-year-old children: evaluating the safety and accuracy by a computer tomography follow-up // J. Spinal. Disord. Tech. 2013. Vol. 26. No. 2. P. E46–52. DOI: 10.1097/BSD.0b013e31825d5c87
8. Wang S., Zhang J., Qiu G., et al. Posterior hemivertebra resection with bisegmental fusion for congenital scoliosis: more than 3 year outcomes and analysis of unanticipated surgeries // Eur. Spine J. 2013. Vol. 22. No. 2. P. 387–393. DOI: 10.1007/s00586-012-2577-4
9. Хабиров Ф.А. Руководство по клинической неврологии позвоночника. Казань: Медицина, 2006.
10. Wright N. P141. Instrumented extreme lateral interbody fusion (XLIF) through a single approach // Spine J. 2005. Vol. 5. No. 4 (Suppl.). P. S177–S178. DOI: 10.1016/j.spinee.2005.05.356
11. Auerbach J.D., Lenke L.G., Bridwell K.H., et al. Major complications and comparison between 3-column osteotomy techniques in 105 con-

secutive spinal deformity procedures // *Spine (Phila Pa 1976)*. 2012. Vol. 37. No. 14. P. 1198–210. DOI: 10.1097/BRS.0b013e31824fffdde

12. Гурская О.Е. Электрофизиологический мониторинг центральной нервной системы. Санкт-Петербург: ОНФД, 2015.

13. Хить М.А., Колесов С.В., Колбовский Д.А., Морозова Н.С. Роль интраоперационного нейрофизиологического мониторинга в предотвращении развития послеоперационных неврологических осложнений в хирургии сколиотической деформации позвоночника // *Нервно-мышечные болезни*. 2014. № 2. С. 26–41.

14. Щекутев Г.А. Нейрофизиологические исследования в клинике НИИ нейрохирургии им. Н.Н. Бурденко. Москва: Антидор, 2001.

15. Никитин С.С., Куренков А.Л. Магнитная стимуляция в диагностике и лечении болезней нервной системы. Руководство для врачей. Москва: САШКО, 2003.

16. Müller K., Kass-Iliyya F., Reitz M. Ontogeny of ipsilateral corticospinal projections: a developmental study with transcranial magnetic stimulation // *Ann. Neurol*. 1997. Vol. 42. No. 5. P. 705–711. DOI: 10.1002/ana.410420506

17. Simon M., Borges L. Intramedullary spinal cord tumor resection. In: Simon M.V. (ed). *Intraoperative clinical neurophysiology. A comprehensive guide to monitoring and mapping*. New York: Demosmedical, 2010. P. 179–208.

18. Deiner S. Highlights of anesthetic considerations for intraoperative neuromonitoring // *Semin. Cardiothorac. Vasc. Anesth*. 2010. Vol. 14. No. 1. P. 51–53. DOI: 10.1177/1089253210362792

REFERENCES

1. Ul'rikh EV. Spinal anomalies in children: A guide for doctors. Saint Petersburg: Sotis; 1995. (In Russ.)

2. Udalova IG, Mikhaylovskiy MV. Neurological complications in scoliosis surgery. *Khirurgiya pozvonochnika*. 2013;(3):38–43. (In Russ.)

3. Crostelli M, Mazza O, Mariani M. Posterior approach lumbar and thoracolumbar hemivertebra resection in congenital scoliosis in children under 10 years of age: results with 3 years mean follow up. *Eur Spine J*. 2014;23(1):209–215. DOI: 10.1007/s00586-013-2933-z

4. Klemme WR, Polly DW Jr, Orchowski JR. Hemivertebral excision for congenital scoliosis in very young children. *J Pediatr Orthop*. 2001;21(6):761–764.

5. Vissarionov SV, Syundyukov AR, Kokushin DN. Comparative analysis of surgical treatment of preschool children with congenital deformity of the spine with isolated hemivertebrae from combined and dorsal approaches. *Ortopediya, travmatologiya i vosstanovitel'naya khirurgiya detskogo vozrasta*. 2019;7(4):5–14. (In Russ.)

6. Guo J, Zhang J, Wang S, et al. Surgical outcomes and complications of posterior hemivertebra resection in children younger than 5 years old. *J Orthop Surg Res*. 2016;11(1):48. DOI: 10.1186/s13018-016-0381-2

7. Li J, Lü GH, Wang B, et al. Pedicle screw implantation in the thoracic and lumbar spine of 1–4-year-old children: evaluating the safety and accuracy by a computer tomography follow-up. *J Spinal Disord Tech*. 2013;26(2):E46–52. DOI: 10.1097/BSD.0b013e31825d5c87

8. Wang S, Zhang J, Qiu G, et al. Posterior hemivertebra resection with bisegmental fusion for congenital scoliosis: more than 3 year outcomes and analysis of unanticipated surgeries. *Eur Spine J*. 2013;22(2):387–393. DOI: 10.1007/s00586-012-2577-4

19. Kalkman C.J., Drummond J.C., Ribberink A.A. Low concentrations of isoflurane abolish motor evoked responses to transcranial electrical stimulation during nitrous oxide/opioid anesthesia in humans // *Anesthesia and Analgesia*. 1991. Vol. 73. No. 4. P. 410–415. DOI: 10.1213/0000539-199110000-00008

20. Sloan T.B. Anesthetic effects on electrophysiologic recordings // *J. Clin. Neurophysiol*. 1998. Vol. 15. No. 3. P. 217–226. DOI: 10.1097/00004691-199805000-00005

21. Bollini G., Docquier P.L., Jouve J.L. Hemivertebrectomy in early-onset scoliosis. In: Akbarian B., Yazici M., Thompson G. (eds). *The growing spine*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2016. P. 555–569. DOI: 10.1007/978-3-662-48284-1_31

22. Белова А.Н., Балдова С.Н. Нейрофизиологический интраоперационный мониторинг при операциях на позвоночнике и спинном мозге (обзор литературы) // *Русский медицинский журнал*. 2016. Т. 23. С. 1569–1574.

23. Новиков В.В., Новикова М.В., Цветовский С.Б., и др. Профилактика неврологических осложнений при хирургической коррекции грубых деформаций позвоночника // *Хирургия позвоночника*. 2011. Т. 3. С. 66–76.

24. Бузунов А.В., Васюра А.С., Долотин Д.Н. Мультимодальный подход в интраоперационном нейромониторинге спинного мозга во время коррекции деформаций позвоночника // *Хирургия позвоночника*. 2021. Т. 18. № 1. С. 31–38. DOI: 10.14531/ss2021.1.31-38

9. Khabirov FA. Guidelines for clinical neurology of spine. Kazan: Medicine; 2006. (In Russ.)

10. Wright N. P141. Instrumented extreme lateral interbody fusion (XLIF) through a single approach. *Spine J*. 2005;5(4 Suppl.):S177–S178. DOI: 10.1016/j.spinee.2005.05.356

11. Auerbach JD, Lenke LG, Bridwell KH, et al. Major complications and comparison between 3-column osteotomy techniques in 105 consecutive spinal deformity procedures. *Spine (Phila Pa 1976)*. 2012;37(14):1198–210. DOI: 10.1097/BRS.0b013e31824fffdde

12. Gurskaya OE. Electrophysiological monitoring of the central nervous system. Saint Petersburg: ONFD; 2015. (In Russ.)

13. Hit MA, Kolesov SV, Kolbovsky DA, Morozova NS. The role of intraoperative neurophysiological monitoring in prevention of postoperative neurological complications in scoliotic spinal deformation surgery. *Neuromuscular diseases*. 2014;(2):36–41. (In Russ.)

14. Schekutev GA. Neurophysiological researches in clinic research institute of neurosurgery named after NN Burdenko. Moscow: Antidor; 2001. (In Russ.)

15. Nikitin SS, Kurenkov AL. Magnetic stimulation in the diagnosis and treatment of diseases of the nervous system. A guide for doctors. Moscow: SASHKO; 2003. (In Russ.)

16. Müller K, Kass-Iliyya F, Reitz M. Ontogeny of ipsilateral corticospinal projections: a developmental study with transcranial magnetic stimulation. *Ann Neurol*. 1997;42(5):705–711. DOI: 10.1002/ana.410420506

17. Simon M, Borges L. Intramedullary spinal cord tumor resection. In: Simon MV (ed). *Intraoperative clinical neurophysiology. A comprehensive guide to monitoring and mapping*. New York: Demosmedical; 2010. P. 179–208.

- 18.** Deiner S. Highlights of anesthetic considerations for intraoperative neuromonitoring. *Semin Cardiothorac Vasc Anesth.* 2010;14(1):51–53. DOI: 10.1177/1089253210362792
- 19.** Kalkman CJ, Drummond JC, Ribberink AA. Low concentrations of isoflurane abolish motor evoked responses to transcranial electrical stimulation during nitrous oxide/opioid anesthesia in humans. *Anesthesia and Analgesia.* 1991;73(4):410–415. DOI: 10.1213/00000539-199110000-00008
- 20.** Sloan TB. Anesthetic effects on electrophysiologic recordings. *J Clin Neurophysiol.* 1998;15(3):217–226. DOI: 10.1097/00004691-199805000-00005
- 21.** Bollini G, Docquier PL, Jouve JL. Hemivertebrectomy in early-onset scoliosis. In: Akbarnia B, Yazici M, Thompson G. (eds).

- The growing spine. Berlin, Heidelberg: Springer; 2016. P. 555–569. DOI: 10.1007/978-3-662-48284-1_31
- 22.** Belova AN, Baldova SN. Neurophysiological intraoperative monitoring during operations on the spine and spinal cord (literature review). *Russkiy meditsinskiy zhurnal.* 2016;(23):1569–1574. (In Russ.)
- 23.** Novikov VV, Novikova MV, Tsvetovskiy SB, et al. Prevention of neurological complications during surgical correction of gross deformities of the spine. *Khirurgiya pozvonochnika.* 2011;(3):66–76. (In Russ.)
- 24.** Buzunov AV, Vasyura AS, Dolotin DN, et al. Multimodal approach in intraoperative neuromonitoring of the spinal cord during the correction of spinal deformities. *Khirurgiya pozvonochnika.* 2021;18(1):31–38. (In Russ.). DOI: 10.14531/ss2021.1.31–38

ОБ АВТОРАХ

Сергей Валентинович Виссарионов, д-р мед. наук, профессор, чл.-корр. РАН;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4235-5048>;
eLibrary SPIN: 7125-4930; e-mail: vissarionovs@gmail.com

***Айрат Рашитович Сюндыков**, канд. мед. наук;
адрес: 428020, Россия, Чувашская Республика,
г. Чебоксары, ул. Федора Гладкова, д. 33;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8276-9216>;
eLibrary SPIN: 6275-4184; e-mail: sndk-ar@yandex.ru

Николай Станиславович Николаев,
д-р мед. наук, профессор;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1560-470X>;
eLibrary SPIN: 8723-9840; e-mail: nikolaevns@mail.ru

Валентина Александровна Кузьмина,
врач функциональной диагностики;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3159-4764>;
eLibrary SPIN: 9577-9200;
e-mail: kuzmina_va@orthoscheb.com

Павел Николаевич Корняков, врач — травматолог-ортопед;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7124-5473>;
eLibrary SPIN: 9706-1851; e-mail: pashat-1000@mail.ru

Максим Николаевич Максимов,
врач — анестезиолог-реаниматолог;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3762-4864>;
eLibrary SPIN: 6031-8080; e-mail: fc@orthoscheb.com

Ирина Владимировна Михайлова, доцент;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7665-2572>;
eLibrary SPIN-код: 1998-0610; e-mail: ira1840@rambler.ru

AUTHOR INFORMATION

Sergei V. Vissarionov, MD, PhD, D.Sc.,
Professor, Corresponding Member of RAS;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4235-5048>;
eLibrary SPIN: 7125-4930; e-mail: vissarionovs@gmail.com.

***Ayrat R. Syundyukov**, MD, PhD;
address: 33, Fyodor Gladkov str., Cheboksary,
Chuvash Republic, 428020, Russia;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8276-9216>;
eLibrary SPIN: 6275-4184; e-mail: sndk-ar@yandex.ru

Nikolay S. Nikolaev,
MD, PhD, D.Sc., Professor;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1560-470X>;
eLibrary SPIN: 8723-9840; e-mail: nikolaevns@mail.ru

Valentina A. Kuzmina,
MD, doctor of functional diagnostics;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3159-4764>;
eLibrary SPIN: 9577-9200;
e-mail: kuzmina_va@orthoscheb.com

Pavel N. Korniyakov, MD, orthopedic and trauma surgeon;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7124-5473>;
eLibrary SPIN: 9706-1851; e-mail: pashat-1000@mail.ru

Maxim N. Maksimov,
MD, anesthesiologist-resuscitator;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3762-4864>;
eLibrary SPIN: 6031-8080; e-mail: fc@orthoscheb.com

Irina V. Mikhailova, MD, Associate Professor;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7665-2572>;
eLibrary SPIN: 1998-0610; e-mail: ira1840@rambler.ru