

ИНТРАОПЕРАЦИОННЫЙ НЕЙРОФИЗИОЛОГИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ПРИ ХИРУРГИЧЕСКОМ ЛЕЧЕНИИ ПОЯСНИЧНОГО СТЕНОЗА ПОЗВОНОЧНОГО КАНАЛА

А.В. Красильников, С.Н. Трифонов, А.В. Сафронов

ГБУ Республики Марий Эл «Республиканская клиническая больница»; Россия, Республика Марий Эл, 424037 Йошкар-Ола, ул. Осипенко, д. 33

Контакты: Александр Владимирович Красильников dr.krasilnikoff@mail.ru

Введение. Поясничный стеноз позвоночного канала – патологическое сужение центрального позвоночного канала, латерального кармана или межпозвонкового отверстия. Частота осложнений хирургии данного дефекта составляет от 10 до 24 %. С целью снижения числа интраоперационных и ранних послеоперационных осложнений, сопровождающихся развитием неврологического дефицита, применяются различные методики интраоперационного нейрофизиологического мониторинга.

Цель исследования – изучение информативности интраоперационного нейрофизиологического мониторинга при хирургическом лечении дегенеративного поясничного стеноза позвоночного канала на базе нейрохирургического отделения ГБУ «Республиканская клиническая больница» (Йошкар-Ола, Республика Марий Эл).

Материалы и методы. В ретроспективное исследование включены 69 декомпрессиивно-стабилизирующих оперативных вмешательств по поводу дегенеративного поясничного стеноза позвоночного канала на уровне L3–L5, выполненных с применением интраоперационного нейрофизиологического мониторинга (спонтанная электромиография, транскраниальные моторные вызванные потенциалы, соматосенсорные вызванные потенциалы, стимуляционная электромиография).

Результаты. При проведении интраоперационного нейрофизиологического мониторинга у всех пациентов получены транскраниальные моторные вызванные потенциалы с нижних конечностей. В большинстве случаев зарегистрированы нормальные показатели соматосенсорных вызванных потенциалов, у 12 (17,4 %) пациентов исходные соматосенсорные вызванные потенциалы не получены вследствие сопутствующей соматической патологии. Методом стимуляционной электромиографии исследованы 308 установленных транспедикулярных винтов. Мышечные ответы получены в ходе 31 (45 %) операции, это 45 (14,6 %) винтов. Истинно отрицательные ответы получены при исследовании 29 (64,4 %) винтов, истинно положительные и ложноположительные – при стимуляции 12 (26,7 %) и 4 (8,9 %) винтов соответственно. В послеоперационном периоде у всех пациентов отсутствовал неврологический дефицит, неврологических признаков мальпозиции винтов не выявлено.

Заключение. Применение мультимодального интраоперационного нейрофизиологического мониторинга при хирургическом лечении поясничного стеноза позвоночного канала снижает риск послеоперационных неврологических осложнений.

Ключевые слова: поясничный стеноз позвоночного канала, интраоперационный нейрофизиологический мониторинг, стимуляционная электромиография

Для цитирования: Красильников А.В., Трифонов С.Н., Сафронов А.В. Интраоперационный нейрофизиологический мониторинг при хирургическом лечении поясничного стеноза позвоночного канала. Нейрохирургия 2023;25(1):47–52. DOI: 10.17650/1683-3295-2023-25-1-47-52

Intraoperative neurophysiological monitoring in surgery of lumbar spinal stenosis

A. V. Krasilnikov, S. N. Trifonov, A. V. Safronov

Republican Clinical Hospital of the Mari El Republic; 33 Osipenko St., Yoshkar-Ola 424037, Mari El Republic, Russia

Contacts: Aleksandr Vladimirovich Krasilnikov dr.krasilnikoff@mail.ru

Background. Lumbar spinal stenosis is a pathological constriction of the central spinal canal, lateral pocket or intervertebral foramen. The complication rate of lumbar spinal stenosis surgery ranges from 10 to 24 %. In order to reduce

the number of intraoperative and early postoperative complications accompanied by the development of neurological deficit, various techniques of intraoperative neurophysiological monitoring are used.

Aim. Study of informativity of the use of intraoperative neurophysiological monitoring during surgical treatment of degenerative lumbar spinal stenosis based on the experience of the neurosurgical department of the Republican Clinical Hospital (Yoshkar-Ola, Mari El Republic).

Materials and methods. Thus, 69 decompressive-stabilizing surgical interventions for degenerative lumbar spinal stenosis at the L3–L5 level, performed with intraoperative neurophysiological monitoring (free-run electromyography, transcranial motor evoked potentials, somatosensory evoked potentials, triggered electromyography were included in the retrospective study).

Results. During intraoperative neurophysiological monitoring transcranial motor evoked potentials from the legs was registered in all cases. Normal somatosensory evoked potentials were recorded in most cases, in 12 cases (17.4 %) baseline somatosensory evoked potentials were not registered due to preoperative neurological deficits and the presence of concomitant somatic pathology. 308 inserted pedicular screws were examined using the triggered electromyography. Muscle responses were registered in 31 (45 %) operations, 45 (14 %) screws. True negatives were registered with 29 (64.4 %), true positives were registered with 12 (26.7 %), and false positives were registered with 4 (8.9 %) screws. In the postoperative period no increase in motor and sensory neurological deficits was observed in all patients; no neurological signs of screw malpositioning were revealed.

Conclusion. The use of multimodal intraoperative neurophysiological monitoring during surgical treatment of lumbar spinal stenosis reduces the risk of postoperative neurological complications.

Keywords: lumbar spinal stenosis, intraoperative neurophysiological monitoring, triggered electromyography

For citation: Krasilnikov A.V., Trifonov S.N., Safronov A.V. Intraoperative neurophysiological monitoring in surgery of lumbar spinal stenosis. *Neyrokhirurgiya = Russian Journal of Neurosurgery* 2023;25(1):47–52. (In Russ.). DOI: 10.17650/1683-3295-2023-25-1-47-52

ВВЕДЕНИЕ

Поясничный стеноз позвоночного канала (пСПК) — это патологическое сужение центрального позвоночного канала, латерального кармана или межпозвоночного отверстия [1]. По данным литературы, стеноз позвоночного канала (СПК) определяется уменьшением переднезаднего размера (менее 10 мм) и площади поперечного сечения (менее 100 мм²) [2]. Эта патология позвоночника, сопровождающаяся клиническими проявлениями, встречается у 5 % людей до 50 лет и у 10–15 % в возрасте 50–70 лет [3].

В 1803 г. французский анатом и врач Антуан Портал впервые описал сужение просвета позвоночного канала, вызванное патологическим искривлением позвоночника [4]. С 1954 г. голландский нейрохирург Хенк Вербист стал детально изучать тему дегенеративного пСПК. Он ввел классификацию стеноза, впервые описал синдром нейрогенной перемежающейся хромоты и опубликовал данные о 7 пациентах с этой патологией, у которых произошел регресс неврологического дефицита после выполненного декомпрессивного вмешательства [5]. В 1976 г. группа американских ортопедов предложила использовать аббревиатуру LSS (lumbar spinal stenosis), под которой следует понимать сужение просвета позвоночного канала или межпозвоночных отверстий с развитием неврологического дефицита [6].

Один из вариантов хирургического лечения данной патологии — декомпрессия позвоночного канала с последующей фиксацией позвонков дорзальными имплантатами (транспедикулярная фиксация).

Частота осложнений хирургии пСПК составляет от 10 до 24 % [7]. Применение транспедикулярных

систем сопряжено с риском развития осложнений (повреждение твердой мозговой оболочки, травматизация спинномозговых корешков, мальпозиция устанавливаемых винтов) [8].

С целью снижения числа интраоперационных и ранних послеоперационных осложнений, сопровождающихся развитием неврологического дефицита, при декомпрессивно-стабилизирующих вмешательствах на позвоночнике применяются различные методики интраоперационного нейрофизиологического мониторинга (ИОНМ): спонтанная электромиография (ЭМГ), транскраниальные моторные вызванные потенциалы (ТкМВП), соматосенсорные вызванные потенциалы (ССВП), стимуляционная ЭМГ (сЭМГ). Спонтанная ЭМГ и ТкМВП — эффективные методы мониторинга неврологических функций, у них большая прогностическая значимость при декомпрессии позвоночного канала на поясничном уровне [9]. Для контроля сохранности функции задних столбов спинного мозга регистрируют ССВП при операциях на позвоночнике [10]. Стимуляционная ЭМГ играет важную роль для выявления мальпозиции винтов и предотвращения возникновения возможного послеоперационного неврологического дефицита [11]. Пороговое значение силы тока 10–12 мА может считаться оптимальным для контроля установки транспедикулярных винтов в поясничном отделе позвоночника [12].

При хирургических вмешательствах на позвоночнике чувствительность отдельных модальностей ИОНМ составляет от 13 до 81 %, в то время как чувствительность мультимодального ИОНМ достигает 93 % [13].

Цель работы — изучение информативности ИОНМ при хирургическом лечении дегенеративного пСПК на основании опыта нейрохирургического отделения ГБУ Республики Марий Эл «Республиканская клиническая больница» (г. Йошкар-Ола).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В нейрохирургическом отделении ГБУ Республики Марий Эл «Республиканская клиническая больница» (г. Йошкар-Ола) с 2019 по 2021 г. 5 нейрохирургов выполнили декомпрессивно-стабилизирующие хирургические вмешательства 69 пациентам с дегенеративным пСПК на уровне L3–L5. У пациентов отмечался болевой синдром силой 3–7 баллов по визуально-аналоговой шкале боли (ВАШ), а также синдром перемежающейся нейрогенной хромоты, чувство онемения в стопах при ходьбе. В возрасте до 50 лет прооперированы 8 пациентов, от 50 до 70 лет — 46, старше 70 лет — 15. В исследование включены 34 мужчины и 35 женщин. По данным магнитно-резонансной томографии локализация СПК на уровне L3–L4 выявлена у 13 больных, L4–L5 — у 40, L3–L5 — у 16.

Все оперативные вмешательства проводились с использованием системы Siemens ARCADIS Orbic (Siemens, Германия) для интраоперационной флюороскопии и 32-канальной системы «Нейро-ИОМ» (ООО «Нейрософт», Россия) для ИОНМ.

Анестезиологическое обеспечение хирургического лечения данной патологии позвоночника проводилось с использованием ингаляционной анестезии. Во время интубации вводилось 0,6 мг/кг рокурония бромид. Основной наркоз — десфлюран 6 % об. при потоке кислорода 0,8 л/мин. Каждые 20 мин вводился опиоидный синтетический анальгетик фентанил (0,1 мкг дробно). В течение оперативного вмешательства поддерживался показатель минимальной альвеолярной

концентрации (англ. Minimum alveolar concentration, MAC) в пределах 0,7–0,8.

При хирургическом лечении дегенеративного пСПК применялись следующие методики мультимодального ИОНМ (см. таблицу).

1. *Спонтанная ЭМГ* — непрерывная запись биоэлектрической активности мышц. Эта методика дает возможность оценить наличие механического раздражения и предупредить возможную хирургическую травматизацию нервных структур.

2. *Транскраниальные моторные вызванные потенциалы* — для оценки двигательной функции нижних конечностей путем электрической стимуляции моторной коры головного мозга и получения моторных ответов с мышц. Стимулирующие электроды при ТкМВП устанавливались в точках C3–C4 по международной системе размещения электродов «10–20 %», рекомендованной Международной федерацией электроэнцефалографии и клинической нейрофизиологии. Регистрация велась мышц нижних конечностей, согласно уровню оперативного вмешательства: мышца, отводящая большой палец стопы — на уровне L5–S1, передняя большеберцовая мышца — L4–L5, латеральная головка четырехглавой мышцы бедра — L2–L4. Стимуляция проводилась пачками из 5 стимулов при силе тока 200–300 мА длительностью 100 мкс, межстимульный интервал — 2 мс.

3. *Соматосенсорные вызванные потенциалы* — для контроля чувствительной функции нижних конечностей. При ССВП выполнялась стимуляция большеберцовых нервов (*nervus tibialis*) с регистрацией в точках Cz — Fz по международной системе размещения электродов «10–20 %». Параметры стимуляции: сила тока 20–30 мА, частота 4,12 Гц, длительность 200 мкс.

4. *Стимуляционная электромиография* проводилась с помощью монополярного стимулятора типа «ball-tip»

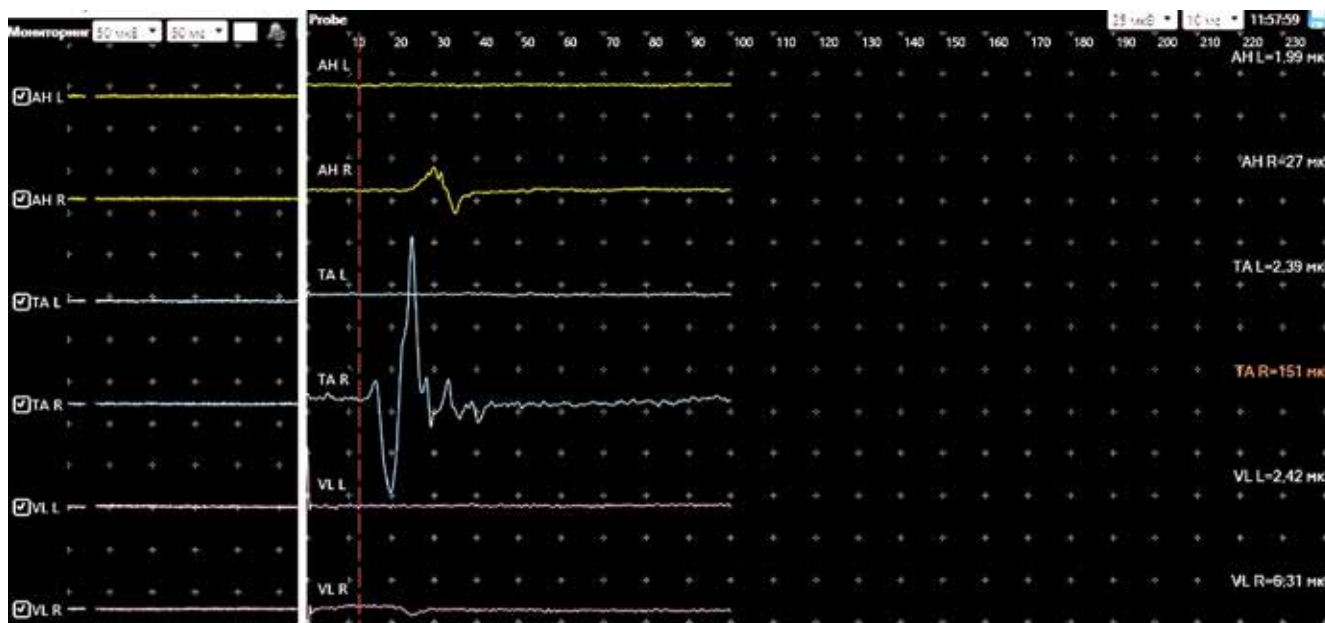
Параметры регистрации модальностей интраоперационного нейрофизиологического мониторинга при хирургическом лечении поясничного стеноза позвоночного канала

Parameters of registration of intraoperative neurophysiological monitoring modalities during surgical treatment of lumbar spinal stenosis

Метод ИОНМ IONM method	Положение регистрирующих электродов Position of the recording electrodes	Положение стимулирующих электродов Position of the stimulating electrodes	Сила стимула, мА Stimulation strength, mA	Частота, Гц Current frequency, Hz	Длительность стимуляции, мкс Stimulation time, μs
ТкМВП TcMEP	Мышцы конечностей Extremities muscles	C3–C4	200–300	—	100
ССВП SSEP	Точки Cz–Fz Cz–Fz points	N. tibialis	20–30	4,12	200
сЭМГ tEMG	Мышцы конечностей Extremities muscles	На винтах On the screws	0–20	2	200

Примечание. ИОНМ — интраоперационный нейрофизиологический мониторинг; ТкМВП — транскраниальные моторные вызванные потенциалы; ССВП — соматосенсорные вызванные потенциалы; сЭМГ — стимуляционная электромиография; N. Tibialis (*Nervus tibialis*) — большеберцовый нерв.

Note. IONM — intraoperative neurophysiological monitoring TcMEP — transcranial motor evoked potentials; SSEP — somatosensory evoked potentials; tEMG — triggered electromyography; N. Tibialis (*Nervus tibialis*) — tibial nerve.



Стимуляционная электромиография. Прямая стимуляция винта в L5-позвонке справа. М-ответ мышцы, отводящей большой палец стопы (*musculus abductor hallucis*), передней большеберцовой мышцы (*musculus tibialis anterior*) справа при силе стимула 6 мА

Triggered electromyography. Stimulation of the screw in the L5 on the right side. Muscle responses (M-response) from *musculus abductor hallucis* and *musculus tibialis anterior* under 6 mA current stimulation

с шарообразным наконечником при постепенном увеличении силы тока от 0 до 20 мА, частотой 2 Гц, длительностью стимула 200 мкс. При сЭМГ установка винта считалась корректной при отсутствии мышечного ответа (М-ответа) или его регистрации при большой силе стимула. Критическим пороговым значением принят стимул силой 10 мА (см. рисунок).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Мультимодальный ИОНМ проводился на всех этапах оперативного лечения: до и после разреза, во время установки винтов, на этапе декомпрессии позвоночного канала.

При проведении ИОНМ получены ТкМВП с нижних конечностей у всех пациентов, что обусловлено, вероятно, частичным повреждением нервных структур и иннервацией исследуемых мышц несколькими корешками. Значимого отклонения показателей амплитуды и латентности на протяжении оперативного вмешательства не отмечено.

В большинстве случаев зарегистрированы нормальные показатели ССВП. У 12 (17,4 %) пациентов исходные ССВП не получены ввиду дооперационного неврологического дефицита и сопутствующей соматической патологии (сахарный диабет).

При проведении всех оперативных вмешательств значимых изменений в ТкМВП и ССВП не зафиксировано. Необходимость их применения объясняется тем, что среди осложнений при данном виде хирургии встречаются повреждение спинномозговых корешков, миелит, нарушение спинального кровообращения,

а данные модальности ИОНМ позволяют выявить их интраоперационно.

В послеоперационном периоде у всех пациентов отмечалось уменьшение болевого синдрома на 20–70 % по ВАШ, неврологический дефицит отсутствовал.

Методом сЭМГ исследованы 308 установленных транспедикулярных винтов. М-ответы получены в ходе 31 (45 %) операции, это 45 (14 %) винтов.

Истинно отрицательные результаты (порог М-ответа выше критического, признаков повреждения медиальной стенки ножки позвонка на основании действий хирурга и интраоперационной флюороскопии нет) получены при исследовании 29 (64,4 %) винтов. При силе тока более 15 мА М-ответы зарегистрированы при стимуляции 7 винтов, при 10–15 мА – 22 винтов. В послеоперационном периоде болевой корешковый синдром не наблюдался.

При силе тока менее 10 мА М-ответы получены при стимуляции 16 (35,6 %) винтов. В совокупности с данными интраоперационного рентгенографического контроля и этапа декомпрессии позвоночного канала эти результаты ИОНМ расценены как истинно положительные (порог М-ответа ниже критического в сочетании с признаками нарушения целостности медиальной стенки ножки позвонка и мальпозиции винта в спинномозговой канал). Все винты были переустановлены, после чего получены следующие результаты: при стимуляции 5 (11,1 %) винтов – нет М-ответа до 20 мА; 7 (15,6 %) винтов – М-ответ при 10–15 мА; 4 (8,9 %) винта оставлены с М-ответом при стимуляции менее 10 мА (ложноположительные

результаты — порог М-ответа ниже критического, отсутствие признаков повреждения медиальной стенки ножки позвонка). В послеоперационном периоде неврологических нарушений (радикулярного болевого синдрома, двигательных и чувствительных расстройств), вызванных мальпозицией винтов, не выявлено.

ОБСУЖДЕНИЕ

Повреждение медиальной стенки ножки позвонка и мальпозиция винтов в спинномозговой канал — серьезные осложнения декомпрессивно-стабилизирующих операций, которые могут привести к неврологическим и сосудистым нарушениям и нестабильности металлоконструкции [14].

По данным некоторых авторов, частота мальпозиции винтов при установке под контролем интраоперационной флюороскопии составляет 20,3 % [15].

А.К. Калия-Перумал и соавт. в своей работе проанализировали результаты установки 3112 винтов при хирургическом лечении 518 пациентов на уровне L1—S1. В группе из 296 больных (1856 винтов) применялась сЭМГ, при этом повторная операция понадобилась только 1 (0,34 %) пациенту. В группе из 222 больных (1256 винтов) при установке винтов ИОНМ не прово-

дился, в этом случае 6 (2,7 %) пациентам выполнено ревизионное вмешательство [11].

Таким образом, применение сЭМГ делает установку винтов более точной и безопасной [14]. Из опыта нейрохирургического отделения Республиканской клинической больницы Йошкар-Олы: в период с 2019 по 2021 г. из 308 винтов переустановлено 16 (5,2 %), что в целом отличается от литературных данных и показывает необходимость дальнейшего исследования роли ИОНМ при хирургическом лечении дегенеративного пСПК.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение мультимодального ИОНМ при хирургическом лечении пСПК снижает риск послеоперационных неврологических осложнений. Регистрация ТкМВП и ССВП позволяет проводить непрерывную оценку моторной и сенсорной функций нижних конечностей и предупредить возможные осложнения. Уменьшить вероятность мальпозиции устанавливаемых винтов дает возможность применения сЭМГ.

Такой подход направлен на предупреждение развития двигательного и чувствительного дефицита, исключение некорректной установки винтов и, как следствие, уменьшение вероятности ревизионных операций.

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

- Issack P.S., Cunningham M.E., Pumberger M. et al. Degenerative lumbar spinal stenosis: evaluation and management. *J Am Acad Orthop Surg* 2012;20(8):527–35. DOI: 10.5435/JAAOS-20-08-527
- Steurer J., Roner S., Gnannt R., Hodler J.; LumbSten Research Collaboration. Quantitative radiologic criteria for the diagnosis of lumbar spinal stenosis: a systematic literature review. *BMC Musculoskelet Disord* 2011;12:175. DOI: 10.1186/1471-2474-12-175
- Otani K., Kikuchi S., Yabuki S. et al. Lumbar spinal stenosis has a negative impact on quality of life compared with other comorbidities: an epidemiological cross-sectional study of 1862 community-dwelling individuals. *Scientific World Journal* 2013;2013:590652. DOI: 10.1155/2013/590652
- Verbiest H. Stenosis of the lumbar vertebral canal and sciatica. *Neurosurg Rev* 1980;3(1):75–89. DOI: 10.1007/BF01644422
- Verbiest H. A radicular syndrome from developmental narrowing of the lumbar vertebral canal. *J Bone Joint Surg Br* 1954; 36-B(2):230–7. DOI: 10.1302/0301-620X.36B2.230
- Arnoldi C.C., Brodsky A.E., Cauchoix J. et al. Lumbar spinal stenosis and nerve root entrapment syndromes. Definition and classification. *Clin Orthop Relat Res* 1976;(115):4–5.
- Zaina F., Tomkins-Lane C., Carragee E., Negrini S. Surgical versus non-surgical treatment for lumbar spinal stenosis. *Cochrane Database Syst Rev* 2016;2016(1):CD010264. DOI: 10.1002/14651858.CD010264.pub2
- Knop C., Bastian L., Lange U. et al. Complications in surgical treatment of thoracolumbar injuries. *Eur Spine J* 2002 Jun; 11(3):214–26. DOI: 10.1007/s00586-001-0382-6
- Voulgaris S., Karagiorgiadis D., Alexiou G.A. et al. Continuous intraoperative electromyographic and transcranial motor evoked potential recordings in spinal stenosis surgery. *J Clin Neurosci* 2010;17(2):274–6. DOI: 10.1016/j.jocn.2009.04.013
- Deletis V., Sala F. Intraoperative neurophysiological monitoring of the spinal cord during spinal cord and spine surgery: a review focus on the corticospinal tracts. *Clin Neurophysiol* 2008;119(2):248–64. DOI: 10.1016/j.clinph.2007.09.135
- Kaliya-Perumal A.K., Charn J.R., Niu C.C. et al. Intraoperative electromyographic monitoring to optimize safe lumbar pedicle screw placement — a retrospective analysis. *BMC Musculoskelet Disord* 2017;18(1):229. DOI: 10.1186/s12891-017-1594-1
- Mikula A.L., Williams S.K., Anderson P.A. The use of intraoperative triggered electromyography to detect misplaced pedicle screws: a systematic review and meta-analysis. *J Neurosurg Spine* 2016;24(4):624–38. DOI: 10.3171/2015.6.SPINE141323
- Sutter M., Eggspuehler A., Jeszenszky D. et al. The impact and value of uni- and multimodal intraoperative neurophysiological monitoring (IONM) on neurological complications during spine surgery: a prospective study of 2728 patients. *Eur Spine J* 2019; 28(3):599–610. DOI: 10.1007/s00586-018-5861-0
- Isley M.R., Zhang X.F., Balzer J.R., Leppanen R.E. Current trends in pedicle screw stimulation techniques: lumbosacral, thoracic, and cervical levels. *Neurodiagn J* 2012;52(2):100–75.
- Guzey F.K., Emel E., Hakan Seyithanoglu M. et al. Accuracy of pedicle screw placement for upper and middle thoracic pathologies without coronal plane spinal deformity using conventional methods. *J Spinal Disord Tech* 2006;19(6):436–41. DOI: 10.1097/00024720-200608000-00011

Вклад авторов

А.В. Красильников: разработка концепции исследования, сбор и обработка материала, анализ данных, сбор данных литературы, написание и редактирование статьи;
С.Н. Трифонов: разработка концепции исследования, написание и редактирование статьи.
А.В. Сафронов: разработка концепции исследования.

Author's contribution

A.V. Krasilnikov: research idea of the study, collection and processing of material, data analysis, writing and editing of the article;
S.N. Trifonov: development of the research concept, writing and editing of the article.
A.V. Safronov: development of the research concept.

ORCID авторов/ ORCID of authors

А.В. Красильников / A.V. Krasilnikov: <https://orcid.org/0000-0002-4207-0088>
С.Н. Трифонов / S.N. Trifonov: <https://orcid.org/0000-0003-4697-2350>
А.В. Сафронов / A.V. Safronov: <https://orcid.org/0009-0005-4191-150x>

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Финансирование. Работы выполнялись без внешнего финансирования.

Funding. The work was performed without external funding.

Соблюдение прав пациентов и правил биоэтики. Все пациенты подписали информированное согласие на участие в исследовании.

Compliance with patient rights and principles of bioethics. All patients gave written informed consent to participate in the study.