

УДК 616-092

## Применение интраоперационного нейромониторинга моторных и соматосенсорных вызванных потенциалов для оценки функции корешков спинного мозга при хирургических вмешательствах на позвоночнике

Гулаев Е.В.<sup>1,2</sup>, Баклашев В.П.<sup>2</sup>, Линьков В.В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ивановский государственный медицинский университет» Министерства здравоохранения Российской Федерации. 153012, Иваново, Шереметевский проспект, д. 8.

<sup>2</sup> Федеральное государственное бюджетное учреждение «Федеральный центр мозга и нейротехнологий» Федерального медико-биологического агентства.

117513, Москва, улица Островитянова, д. 1, стр. 10.

**Цель обзора** – оценить роль и эффективность интраоперационного нейромониторинга (ИОМ) вызванных потенциалов в снижении риска радикулярных неврологических осложнений при хирургических вмешательствах на позвоночнике, как в традиционной, так и в минимально инвазивной хирургии.

Был проведен анализ литературы и клинических исследований, охватывающих использование соматосенсорных (ССВП) и моторных вызванных потенциалов (МВП) для мониторинга радикулярных поражений во время операций на позвоночнике. Особое внимание уделялось сравнению эффективности этих методов в контексте различных хирургических подходов, включая дискэктомию, ламинэктомию, спондилосинтез и миниинвазивные техники. Данные литературы показали, что ИОМ значительно снижает риск неврологических осложнений, обеспечивая мониторинг в реальном времени и возможность своевременного реагирования на потенциальные повреждения нервных структур. МВП демонстрируют высокую чувствительность в выявлении повреждений моторных нервных корешков, в то время как ССВП эффективны в оценке сенсорных нервов. Применение мультимодального ИОМ в минимально инвазивной хирургии также уменьшает риск ятрогенных неврологических повреждений, несмотря на ограниченную видимость операционного поля.

Таким образом, ИОМ является ценным инструментом для повышения безопасности пациентов и снижения корешковых неврологических осложнений при хирургическом лечении заболеваний позвоночника. Для максимально эффективного использования этой технологии в клинической практике необходимы дальнейшие исследования для оптимизации методик ИОМ, разработки стандартизированных протоколов и улучшения обучения персонала.

**Ключевые слова:** интраоперационный нейрофизиологический мониторинг; моторные вызванные потенциалы; сенсорные вызванные потенциалы; радикулярные нарушения, спондилодез.

**Для цитирования:** Гулаев Е.В., Баклашев В.П., Линьков В.В. Применение интраоперационного нейромониторинга моторных и соматосенсорных вызванных потенциалов для оценки функции корешков спинного мозга при хирургических вмешательствах на позвоночнике. *Патогенез*. 2024; 22(1): 15-22

**DOI:** 10.25557/2310-0435.2024.01.15-22

**Для корреспонденции:** Гулаев Евгений Владимирович, e-mail: evlgul@mail.ru

**Финансирование.** Исследование не имеет спонсорской поддержки.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Поступила:** 14.02.2024.

## Application of intraoperative neurophysiological monitoring of motor and somatosensory evoked potentials for assessing spinal nerve root function during spinal surgeries

Gulaev E.V.<sup>1,2</sup>, Baklaushev V.P.<sup>2</sup>, Linkov V.V.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Ivanovo State Medical University, Sheremetevskiy Prospekt 8, Ivanovo 153012, Russian Federation

<sup>2</sup> Federal Center for Brain and Neurotechnology of the Federal Medical and Biological Agency, Ostrovitianova Str. 1 Bldg. 10, Moscow 117513, Russian Federation

**The objective** of this review is to assess the role and effectiveness of intraoperative neurophysiological monitoring (IONM) of evoked potentials in reducing the risk of radicular neurological complications during spinal surgeries, both in traditional and minimally invasive approaches.

An analysis of literature and clinical studies was conducted, encompassing the use of somatosensory (SSEP) and motor evoked potentials (MEP) for monitoring radicular injuries during spine operations. Special attention was given to comparing the effectiveness of these methods in the context of various surgical approaches, including discectomy, laminectomy, spinal fusion, and minimally invasive techniques. Literature data demonstrated that IONM significantly reduces the risk of neurological complications by providing real-time monitoring and the ability to promptly respond to potential nerve structure damages. MEPs exhibit high sensitivity in identifying motor nerve root damages, while SSEPs are effective in assessing sensory nerves. The application of multimodal IONM in minimally invasive surgery also reduces the risk of iatrogenic neurological damages, despite the limited visibility of the surgical field.

Thus, IONM is a valuable tool for enhancing patient safety and reducing radicular neurological complications in the surgical treatment of spine diseases. Further research is necessary to optimize IONM techniques, develop standardized protocols, and improve staff training for the most effective use of this technology in clinical practice.

**Key words:** *intraoperative neurophysiological monitoring; motor evoked potentials; somatosensory evoked potentials; radicular disorders; spinal fusion.*

**For citation:** Gulaev E.V., Baklaushev V.P., Linkov V.V. [Application of intraoperative neurophysiological monitoring of motor and somatosensory evoked potentials for assessing spinal nerve root function during spinal surgeries]. *Patogenez* [Pathogenesis]. 2024; 22(1): 15-22. (in Russian)

**DOI:** 10.25557/2310-0435.2024.01.15-22

**For correspondence:** Gulaev Evgenyi Vladimirovich, e-mail: evlgul@mail.ru

**Funding.** The study had no sponsorship.

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

**Received:** 14.02.2024

## Введение

Интраоперационный нейромониторинг (ИОМ) является неотъемлемой частью современных хирургических вмешательств на позвоночнике, обеспечивая критически важную информацию о функциональном состоянии нервной системы во время операций у пациентов всех возрастных категорий. В частности, такие вмешательства сопряжены с риском неврологических осложнений из-за близости спинного мозга и нервных корешков. Эффективный мониторинг этих структур может значительно уменьшить риск постоперационных дефицитов и улучшить результаты хирургического лечения для пациентов. Среди наиболее часто используемых методик мониторинга выделяют соматосенсорные вызванные потенциалы (ССВП), моторные вызванные потенциалы (МВП) и электромиография (ЭМГ) [1–3].

Мониторинг ССВП и МВП в хирургии позвоночника играет ключевую роль в контроле за состоянием корешков спинного мозга и других частей нервной системы. Несмотря на обширное применение этих методов и их потенциальную пользу, данные об их эффективности, особенно в контексте мониторинга нервных корешков, остаются разнообразными и иногда противоречивыми [4, 5]. При этом существуют многочисленные исследования, оценивающие единичное радикулярное поражение в условиях нейрофизиологической лаборатории и на животных моделях [6–8]. Эта ситуация подчеркивает необходимость дополнительных исследований для усовершенствования методов мониторинга и разработки новых подходов, которые позволят более точно отслеживать состояние нервных корешков во время хирургических вмешательств на позвоночнике [9].

Кроме того, отсутствие стандартизированных сигнальных критериев МВП и ССВП, указывающих на повреждение конкретных нервных корешков, также подчеркивает необходимость более глубокого изучения этой проблематики. Текущая ситуация может приводить к возникновению ложноположительных и ложноотрицательных результатов мониторинга, вызванных радикулярным перекрытием, влиянием внешних факторов и индивидуальной изменчивостью пациентов. Разработка более чувствительных и специфичных критериев предупреждения станет ключом к уменьше-

нию числа ложных результатов и повышению точности мониторинга [10].

Интраоперационный нейромониторинг вызванных потенциалов в хирургии поясничного отдела позвоночника при открытых доступах

Хирургические вмешательства на поясничном отделе позвоночника, включая дискэктомии, ламинэктомии и различные виды спондилосинтеза, составляют значительную часть клинической практики нейрохирургов и ортопедов. Важность ИОМ в этих процедурах способствует повышению безопасности пациентов и улучшению хирургических исходов. Согласно исследованиям, от 0,2% до 31% операций на позвоночнике могут сопровождаться неврологическими осложнениями из-за повреждения корешков спинного мозга или других нервных структур. Особенно высок риск хирургических событий при боковом доступе к поясничному отделу, где частота достигает 21,3%. В то время как с антеролатеральным доступом ассоциируется наименьшее количество хирургических осложнений [11].

Кроме того, ятрогенное повреждение, вызванное проникновением винтов через стенку позвоночного отростка во время установки при заднем спондилодезе, представляет собой известное осложнение с оценочным риском от 0,8% до 6,1% [12].

Специальные исследования подтвердили эффективность ИОМ в минимизации риска неврологических повреждений при операциях по коррекции деформаций позвоночника, что привело к увеличению его использования. Тем не менее, рутинное применение ИОМ в спондилодезах поясничного отдела позвоночника остаётся спорным [13–15].

Часто используемые методы, такие как спонтанная и вызванная ЭМГ для мониторинга установки винтов, демонстрируют недостаточную специфичность, вызывая дебаты о целесообразности их рутинного использования. Критики указывают на ложноотрицательные результаты, которые не помогают предотвратить неврологические повреждения. Исследования, такие как работы R.Ajiboye и его коллег, показали, что ИОМ не гарантирует снижение риска послеоперационных осложнений и может повышать стоимость и продолжительность опе-

рации без существенного уменьшения частоты неврологических повреждений [12, 16].

Хирургическое лечение спондилолистеза высокой степени связано с повышенным риском неврологических осложнений, включая радикулопатию L5 и дисфункцию копчика, особенно при исправлении на уровне L5 / S1. Тем не менее, эффективность ИОМ, включая вызванные потенциалы и поверхностную ЭМГ, в выявлении повреждений остается предметом дискуссий. В ряде случаев, несмотря на их применение, не всегда удается своевременно идентифицировать повреждение.

В одном из исследований было выявлено наличие периоперационного двигательного дефицита корешка L5 у 29% пациентов после коррекции спондилолистеза L5–S1. При этом большинство пациентов восстановились в течение трёх месяцев. Снижение амплитуды МВП более чем на 50% использовалось как сигнальный критерий предупреждения, демонстрируя чувствительность 20% к постоперационной радикулопатии L5. ССВП со стимуляцией большеберцового нерва также не показали значимой диагностической ценности, что ставит вопрос о необходимости изучения ССВП со стимуляцией малоберцового нерва в будущих исследованиях [17].

Другое исследование подчеркивает высокую эффективность мультимодального нейромониторинга в диагностике сенсорных и моторных нарушений нервных корешков у пациентов с высокоуровневым спондилолистезом. Мониторинг вызванных потенциалов обеспечил более высокую точность в прогнозировании нарушений по сравнению с использованием одиночных методов, включая ЭМГ. В исследовании, охватившем более 54 пациентов, отрицательное прогностическое значение мультимодального ИОМ достигло 100%, что подчеркивает его значимость в предотвращении постоперационных неврологических дефицитов, особенно связанных с корешками L5 и S1 [16].

Также в другой работе, где показана эффективность мониторинга МВП при спондилолистезе, указывают на важность мониторинга МВП как минимум двух миотомов (ТА и ЕНЛ) для контроля корешковых нарушений. Также было выявлено, что амплитуда МВП является наиболее чувствительным и специфичным индикатором повреждения, в том числе в сравнении с ЭМГ [18]. В работе W.B. Wilent и соавт. ИОМ МВП также показал наибольшую чувствительность в выявлении радикулярных нарушений, достигая 100% в сравнении с ЭМГ (14,3%) и ССВП (28,6%) [19].

В большом ретроспективном анализе 1159 экстрадуральных операций на поясничном отделе позвоночника с ИОМ показано, что сигналы о снижении МВП ответов регистрировались в 11,3%, причем большинство (56%) были связаны с анестезиологическими воздействиями. МВП также выявляли неврологические повреждения эффективнее, чем ССВП и ЭМГ, подчеркивая важность мультимодального ИОМ [20].

Исследование J. Shao и его команды анализировало исходы операций педикулярной субтракционной остеотомии без ИОМ, показывая, что его отсутствие не увеличивает риск неврологических повреждений. Уровень осложнений в группе без ИОМ составил 36%, что соответствует стандартному диапазону для PSO с ИОМ (20–40%). Текущие данные убедительно не подтверждают преимущества ИОМ в снижении неврологических осложнений при PSO на поясничном отделе, подчеркивая необходимость дальнейших исследований для оценки его эффективности [21].

В одном из мета-анализов оценили диагностическую ценность ССВП в прогнозировании постоперационных неврологических осложнений на поясничном отделе позвоночника, анализируя данные 5607 пациентов. Изучались обратимые, необратимые изменения и полная потеря ССВП, каждый из которых связан с разным риском осложнений. Все значимые изменения ССВП имели умеренную чувствительность 44% и высокую специфичность 97%, с отношением шансов 22,13. Полная потеря ССВП, хоть и редкая, значительно увеличивала риск осложнений [22].

В другой серии исследований с участием 1057 пациентов значительные изменения ССВП и потеря ответов в нижних конечностях также показали низкую чувствительность (0,03) и высокую специфичность (0,99), при этом указывая на то, что потеря ответов в ССВП может быть надежным индикатором неврологического дефицита, в том числе радикулярного [23, 24].

В исследовании ИОМ при операциях по поводу спинального стеноза показана высокая чувствительность как ССВП, так и спонтанной ЭМГ на предмет раздражения нервных структур. Однако стоит учесть высокую вероятность ложноположительных результатов ССВП, особенно при серьезном стенозе, когда амплитуды ССВП могут быть низкими или отсутствовать изначально, что делает их практическую ценность предметом обсуждения. При обнаружении интраоперационных изменений ССВП, особенно при контралатеральной декомпрессии, авторами рекомендуется немедленно прекратить хирургические манипуляции и принять дальнейшие решения, исходя из общей клинической картины [25].

Также во время операций на позвоночнике потеря ССВП может быть вызвана временной сосудистой ишемией из-за использования ретрактора для обеспечения доступа к операционному полю. Кроме того, в данном ретроспективном обзоре мониторинга ССВП у 189 пациентов выявлены сигналы тревог в 7,9% случаев, причем частота предупреждений была выше при проведении многоуровневых операций [26].

В одном из исследований оценена значимость мониторинга интраоперационного рефлекса бульбокавернозного (БКР) в ходе заднего спондилодеза. БКР сохранялся у большинства пациентов (151 из 153). У пациентов с сохраненным БКР наблюдались меньшие проблемы с мочеиспусканием по сравнению с теми, у кого БКР

исчезал, также была показана разница через 6 месяцев после операции. Пациенты, у которых БКР временно пропадал, но восстанавливался к концу операции, испытывали минимальные проблемы с мочеиспусканием. Это подчеркивает потенциал мониторинга БКР как показателя неврологического состояния и прогноза восстановления после операции [27].

Одно из исследований изучало эффективность многоканального ИОМ МВП для выявления радикальных нарушений при коррекции деформаций позвоночника у 295 взрослых пациентов. В качестве индикатора повреждения нервного корешка использовалось снижение ответа МВП до менее 30% от базового уровня, что было зафиксировано у семи пациентов (2,4%), среди которых шесть случаев были истинно-положительными, а один – ложноотрицательным. Исследование подтвердило, что многоканальный мониторинг МВП является эффективным инструментом для выявления таких повреждений, особенно когда наблюдается изменение угла наклона таза (РТ) более 17,5°, что ассоциируется с повышенным риском неврологических осложнений [28]. В другом исследовании данных ИОМ 203 пациентов с деформациями груднопоясничного отдела позвоночника выявлено, что уменьшение площади МВП более надежно, чем снижение амплитуды, для идентификации радикальных повреждений, демонстрируя чувствительность и специфичность в 100%. В то время как метод, основанный на уменьшении амплитуды, показал чувствительность 0,89 и специфичность 0,99. Также авторы подчеркивают важность интеграции данных ИОМ с конкретными хирургическими манипуляциями для обеспечения точной диагностики и предотвращения неврологических осложнений [29].

В совокупности, многочисленные исследования подтверждают значимость применения ИОМ вызванных потенциалов при «открытой» хирургии поясничного отдела позвоночника. Несмотря на некоторые дебаты относительно рутинного применения ИОМ и спорные данные о его влиянии на исходы некоторых видов операций, многочисленные исследования подтверждают его положительный вклад в безопасность пациентов и уменьшение послеоперационных дефицитов, что подчеркивает необходимость дальнейшего изучения и оптимизации методик мониторинга для улучшения хирургических исходов и минимизации рисков.

Интраоперационный нейромониторинг вызванных потенциалов в малоинвазивной хирургии поясничного отдела позвоночника

Миниинвазивные хирургические вмешательства, включая эндоскопические методы, такие как трансфораминальная поясничная межпозвоночная фиксация (TLIF) и латеральная поясничная межпозвоночная фиксация (LLIF), представляют собой альтернативу традиционным операциям на поясничном отделе позвоночника. Так, TLIF обеспечивает возможность декомпрессии и фиксации с минимальным вредом для задних структур позвоночника, однако сопряжен с ри-

ском ятрогенных неврологических повреждений из-за ограниченного обзора операционного поля [30].

LLIF, в свою очередь, снижает риск повреждения сосудов и нервных корешков за счет использования бокового доступа, исключая необходимость ретракции спинного мозга. При этом одно из исследований подчеркивает, что частота радикальных осложнений при выполнении LLIF зависит от уровня операции. На верхних уровнях поясничного отдела, где нервы поясничного сплетения (T12–L4) обычно находятся позади хирургического доступа, безопасная зона для операции обычно больше. Однако на более низких уровнях, особенно на уровне L4–L5, безопасная зона существенно уменьшается, что увеличивает риск повреждения нервов во время хирургического вмешательства [31, 32].

Эффективность использования распространенного изолированного ЭМГ мониторинга в ходе миниинвазивных хирургических вмешательств вызывает вопросы, подчеркивая потенциальную ценность мультимодального ИОМ. Включение МВП и ССВП, особенно при стимуляции подкожного нерва, может способствовать снижению риска развития послеоперационных неврологических осложнений. В связи с этим выдвигается предложение к дальнейшему изучению и сравнению эффективности разнообразных стратегий ИОМ [33]. Стоит отметить, что в некоторых работах отмечается даже нарастание частоты корешковых нарушений при миниинвазивной хирургии в сравнении с открытыми хирургическими вмешательствами [34].

В исследовании N. Alan с соавт. изучалась эффективность мониторинга МВП в сравнении с различными методами ЭМГ и ССВП при проведении LLIF на уровне L4–L5. Результаты указали на то, что МВП предоставляют дополнительную информацию, важную для предотвращения неврологических повреждений, особенно при поддержании ретракции. При этом было также отмечено, что ЭМГ оказывается более эффективной во время прохождения через большую поясничную мышцу [35].

Ряд исследований по применению ССВП во время LLIF подтвердили значимость этого метода мониторинга, особенно при стимуляции подкожного нерва. Для мониторинга нижних поясничных и крестцовых корешков во время хирургических операций на поясничном отделе позвоночника часто применяются смешанные нервы, такие как большеберцовый и малоберцовый нервы. Тем не менее, эти методы не всегда адекватно охватывают все поясничное сплетение, особенно верхние поясничные корешки. В качестве альтернативы предложен мониторинг ССВП подкожного нерва, который обеспечивает более точную оценку верхних поясничных корешков. Подкожный нерв, являясь самой длинной чувствительной ветвью бедренного нерва, отвечает за иннервацию медиальной части ноги и стопы. Дистальная стимуляция подкожного нерва показала более высокие амплитуды ответов по сравнению с проксимальной, улучшая таким образом качество монито-

ринга, также для оптимизации записи рекомендуется использование двух каналов регистрации [36, 37].

Так, в одном исследовании у пациентов изменения ССВП отмечались, что расширение ретрактора в некоторых случаях приводило к развитию неврологического дефицита, не сопровождаясь изменениями на ЭМГ [38]. В другом исследовании ССВП подкожного нерва показали 100% чувствительность и специфичность относительно постоперационных осложнений бедренного нерва, при использовании в качестве сигнального критерия в виде снижения амплитуды более чем на 50% [39].

В исследовании M.R. Riley и его коллег изучалась частота постоперационного неврологического дефицита у 479 пациентов после проведения LLIF при проведении мониторинга ЭМГ и МВП. Результаты показали, что применение мониторинга МВП дополнительно снижает частоту поражения нервных структур по сравнению с использованием только ЭМГ. Мониторинг МВП был особенно эффективен в уменьшении как сенсорных, так и моторных дефицитов, предоставляя косвенную оценку целостности сенсорных волокон через мониторинг смешанных нервов, исходящих от поясничного сплетения [40].

Одно из исследований выявило, что после минимально инвазивной TLIF часто встречается дизестезия, связанная с сдавлением корешка нерва и его спинального ганглия инструментами. ИОМ позволил снизить частоту такой дизестезии в три раза, эффективно выявляя и позволяя корректировать сдавление в реальном времени. В то же время, ССВП показали низкую специфичность в выявлении поражений нервных корешков при эндоскопической TLIF [41]. В другом исследовании также отмечается низкая эффективность ССВП для прогнозирования поражения нервных корешков при эндоскопической TLIF [42].

В ряде работ по ИОМ при минимально инвазивной хирургии поясничного отдела позвоночника также производилась оценка достаточности декомпрессии поясничного корешка или других поясничных структур по данным МВП, в которых показано значительное интраоперационное увеличение амплитуды ответов, что также может учитываться для прогнозирования и тактики операции [43, 44].

Минимально инвазивные хирургические методы, такие как TLIF и LLIF, представляют собой значительный прогресс в лечении заболеваний поясничного отдела позвоночника, минимизируя травматизацию и улучшая послеоперационное восстановление. Однако они несут в себе специфические риски ятрогенных неврологических повреждений, особенно из-за ограниченного обзора операционного поля и риска повреждения нервных структур при использовании инструментов. Исследования подчеркивают важность мультимодального ИОМ, включая МВП и ССВП, для эффективного мониторинга и предотвращения неврологических осложнений, особенно при выполнении процедур, требующих ретракции или декомпрессии в узких рабочих зонах. При этом

данные о специфичности и чувствительности ССВП и МВП в контексте минимально инвазивной хирургии указывают на необходимость дальнейших исследований для оптимизации и уточнения методик ИОМ, а также для глубокого понимания их роли в улучшении хирургических исходов и снижении риска послеоперационных неврологических осложнений.

Интраоперационный нейромониторинг вызванных потенциалов в хирургии шейного отдела позвоночника

Операции по декомпрессии и фиксации шейного отдела позвоночника часто проводятся с целью устранения сдавления спинного мозга и корешков нервов. Частота развития нового постоперационного моторного дефицита составляет в диапазоне от 0,2% до 9%, а радикулярные симптомы — в диапазоне от 0,2% до 3,2% после хирургического вмешательства в шейном отделе позвоночника [40].

Мониторинг ССВП и МВП при операциях на шейном отделе позвоночника вызывает противоречия, особенно при контроле корешков спинного мозга. Хотя эти методы активно используются и могут быть полезны для мониторинга спинного мозга, их точность в диагностике повреждений отдельных нервных корешков ограничена, что подчеркивает неоднозначность существующих данных об их эффективности.

Так, в одном из крупнейших исследований интраоперационного нейромониторинга при переднем шейном спондилодезе из-за радикулопатии или миелопатии обнаружено, что ИОМ использовался лишь в 17,1% случаев, с тенденцией к снижению его применения. Не было выявлено значительного влияния ИОМ на снижение послеоперационных неврологических осложнений по сравнению с операциями без нейромониторинга. Комбинация ССВП и МВП применялась в 46,1% случаев, но её использование снизилось с 34,7% до 12,7% между 2007-м и 2014-м годами. Разница в доле послеоперационных неврологических повреждений между группами с ИОМ и без него была незначительна, составив 0,23% и 0,27% соответственно [13].

Одним из наиболее распространенных послеоперационных осложнений является развитие слабости в дельтовидной мышце и бицепсе с повреждением C5 корешка. Частота этого осложнения после шейной ламинэктомии составляет примерно 4,7%, с возможным диапазоном от 0% до 30% [45]. Учитывая значительный риск послеоперационных нарушений функций, связанных с этим корешком, точный мониторинг становится необходимым для минимизации вероятности неврологических последствий. При этом данные эффективности вызванных потенциалов также противоречивы.

Исследование выявило, что снижение амплитуды МВП в бицепсе на 50% и более может служить индикатором для предсказания интраоперационного поражения C5 корешка. В 5 случаях из 155 пациентов с развитием пареза дельтовидной мышцы и бицепса, у трёх наблюдалось значительное уменьшение амплитуды во время операции. В двух случаях отмечался отсро-

ченный дефицит через несколько дней после операции, без значимых изменений при мониторинге [45].

При этом в другом исследовании МВП и ССВП показали очень низкую чувствительность. Так, ни у одного из пациентов с ослаблением дельтовидной мышцы после операции не наблюдалось аномальных изменений в МВП и ССВП. Выводом работы было, что только устойчивая активность ЭМГ корешка С5 во время операции может служить важным предупреждающим сигналом о возможном раздражении или повреждении нерва [46].

Ряд работ посвящены возможности улучшения МВП непосредственно после декомпрессии интраоперационно. Так, в одном из исследований было показано, что эндоскопические фораминотомии шейного отдела позвоночника продемонстрировали высокую эффективность в лечении шейной радикулопатии. В обеих группах отмечалось значительное улучшение проведения МВП после декомпрессии корешка, при этом эндоскопическая фораминотомия обеспечила среднее улучшение на 273%, в то время как микроэндоскопическая – на 130% [47].

Также есть данные о возможности улучшения показателей МВП не только на корешковом уровне, но и на уровне спинного мозга при операциях на шейном отделе позвоночника. В анализе 317 случаев с данными ИОМ выявлено 29 случаев с улучшением сигналов ИОМ по сравнению с базовым уровнем. У всех пациентов наблюдалось улучшение сигналов ИОМ во время операции и значительное улучшение неврологических функций после операции [48].

В ряде работ анализировалась прогностическая способность значительных изменений вызванных потенциалов предсказывать постоперационные неврологические осложнения после операций на шейном отделе позвоночника. Так, был проведен мета-анализ литературы, с общей выборкой в 7747 пациентов, перенесших хирургическое лечение шейного отдела позвоночника с мониторингом ССВП. Потеря сигналов ССВП показала чувствительность 17,3% и специфичность 99,6%. При передних доступах изменения ССВП, чувствительность 34,2% и специфичность 94,7%, при задних – чувствительность 42,6% и специфичность 94,0%. При этом в данном исследовании было показано, что одиночные поражения корешков составляли значительную часть двигательного неврологического дефицита (60 из 132 случаев), с преимущественным поражением С5 корешка. Выводы исследования подчеркивают, что мониторинг ССВП обладает высокой специфичностью, но ограниченной чувствительностью для определения постоперационного неврологического дефицита после операций на шейном отделе позвоночника. Пациенты с новыми постоперационными неврологическими дефицитами почти в 27 раз чаще испытывали значительные интраоперационные изменения ССВП. Потеря сигналов ССВП и необратимые изменения ССВП указывают на зна-

чительно более высокий риск травмы по сравнению с обратимыми изменениями ССВП [49].

Также в другом исследовании данной научной группы оценивалась способность прогнозирования постоперационных неврологических осложнений при операциях по декомпрессии шейного отдела позвоночника на основании данных МВП. Был проведен мета-анализ, который показал, что изменения имеют высокую специфичность (94%), но низкую чувствительность (56%) для предсказания постоперационного неврологического дефицита. При этом необратимые изменения МВП показали гораздо более высокий риск дефицитов по сравнению с обратимыми изменениями. Пациенты с новыми постоперационным неврологическим дефицитом в 19 раз более вероятно имели интраоперационные изменения МВП [50].

## Заключение

В обзоре литературы рассмотрены различные исследования, охватывающие широкий спектр хирургических вмешательств на позвоночнике, включая минимально инвазивные операции. Особое внимание уделено роли интраоперационного нейромониторинга моторных и соматосенсорных вызванных потенциалов в предотвращении неврологического дефицита при повреждении нервных корешков. Исследования подтвердили, что мониторинг вызванных потенциалов является эффективным инструментом для снижения риска неврологических осложнений, особенно в операциях на поясничном отделе позвоночника, показывая высокую чувствительность в выявлении повреждений нервных корешков.

Применение нейромониторинга особенно ценно в минимально инвазивных операциях, как LLIF, где ограниченное операционное поле увеличивает риск повреждений. Мониторинг соматосенсорных вызванных потенциалов от подкожного нерва демонстрирует эффективность в выявлении неврологических дефицитов, предоставляя точную информацию для таких операций, улучшая исходы по сравнению со стимуляцией малоберцовых нервов.

Тем не менее, несмотря на положительные результаты, данные о наилучших методах и стратегиях нейромониторинга остаются противоречивыми. Эффективность и надежность методов зависят от множества факторов, включая тип хирургического вмешательства и индивидуальные особенности пациента, что подчеркивает необходимость дальнейших исследований для оптимизации протоколов и обучения персонала, с целью повышения точности мониторинга.

Следовательно, мультимодальный интраоперационный нейромониторинг представляет собой важный инструмент в снижении риска неврологических осложнений при хирургии позвоночника, обеспечивая хирургам важные данные для оптимизации тактики и своевременного реагирования на риски. Однако, для дости-

жения наилучших клинических результатов требуются дополнительные исследования и улучшение методик мониторинга.

### Список литературы / References

1. Austerman R.J., Sulhan S., Steele W.J., Sadrameli S.S., Holman P.J., Barber S.M. The utility of intraoperative neuromonitoring on simple posterior lumbar fusions-analysis of the National Inpatient Sample. *J. Spine Surg.* 2021; 7(2): 132–140. DOI: 10.21037/jss-20-679
2. Legatt A.D., Emerson R.G., Epstein C.M., MacDonald D.B., Deletis V., Bravo R.J., López J.R. ACNS Guideline: Transcranial Electrical Stimulation Motor Evoked Potential Monitoring. *J. Clin. Neurophysiol.* 2016; 33(1): 42–50. DOI: 10.1097/WNP.0000000000000253
3. Nair B.R., Ramamani M., Singh G., Babu K.S., Rajshekhar V. Feasibility and diagnostic accuracy of intra-operative monitoring of motor evoked potentials in children <2 years of age undergoing tethered cord surgery: results in 100 children. *Childs Nerv. Syst.* 2021; 37(7): 2289–2298. DOI: 10.1007/s00381-021-05128-5
4. Cofano F., Zenga F., Mammì M., Altieri R., Marengo N., Ajello M., Pacca P., Melcarne A., Junemann C., Ducati A., Garbossa D. Intraoperative neurophysiological monitoring during spinal surgery: technical review in open and minimally invasive approaches. *Neurosurg. Rev.* 2019; 42(2): 297–307. DOI: 10.1007/s10143-017-0939-4
5. Mao G., Elhamdani S., Gigliotti M.J., Mace Z., Scabassi R., Oh M., Whiting D. Neurologic Complications in Monitored versus Unmonitored Image-Guidance Assisted Posterior Lumbar Instrumentation. *World Neurosurgery.* 2021; 152: 155–160. DOI: 10.1016/j.wneu.2021.05.074
6. Bryndal A., Wojtyśiak M., Moskal J., Lipiec-Kowalska J., Borowczyk M., Tańska M., Grochulska A., Huber J., Majchrzycki M. Motor Evoked Potentials after Supraspinal Stimulation in Pre- and Postoperative Evaluations of Patients with Cervical Radiculopathy. *BioMed Res. Int.* 2019; 2019: 1–11. DOI: 10.1155/2019/4576493
7. Valone F., Lyon R., Lieberman J., Burch S. Efficacy of transcranial motor evoked potentials, mechanically elicited electromyography, and evoked electromyography to assess nerve root function during sustained compression in a porcine model. *Spine (Phila Pa 1976).* 2014; 39(17): 989–993. DOI: 10.1097/BRS.0000000000000442
8. Kozaki T., Tsutsui S., Yamada H. Transcranial motor evoked potentials electrically elicited by multi-train stimulation can reflect isolated nerve root injury more precisely than those by conventional multi-pulse stimulation: an experimental study in rats. *J. Clin. Monit. Comput.* 2020; 34(1): 125–129. DOI: 10.1007/s10877-019-00296-x
9. Epstein N.E. Perspective: Can intraoperative neurophysiological monitoring (IONM) limit errors associated with lumbar pedicle screw fusions/transforaminal lumbar interbody fusions (TLIF)? *Surg. Neurol. Int.* 2023; 14: 314. DOI: 10.25259/SNI\_671\_2023
10. MacDonald D.B. Overview on Criteria for MEP Monitoring. *J. Clin. Neurophysiol.* 2017; 34(1): 4. DOI: 10.1097/WNP.0000000000000302
11. Umair M., Asghar M., Jahangiri F. The incidence rate of motor evoked potential alerts in 1159 lumbar spinal surgeries. *J. Neurol. Neurophysiol.* 2022; 13: 001–003. DOI: 10.35248/2471-268X.22.13.10.591
12. Ajiboye R.M., Zoller S.D., D’Oro A., Burke Z.D., Sheppard W., Wang C., Buser Z., Wang J.C., Pourtaheri S. Utility of Intraoperative Neuromonitoring for Lumbar Pedicle Screw Placement Is Questionable: A Review of 9957 Cases. *Spine (Phila Pa 1976).* 2017; 42(13): 1006–1010. DOI: 10.1097/BRS.0000000000001980
13. Ajiboye R.M., D’Oro A., Ashana A.O., Buerba R.A., Lord E.L., Buser Z., Wang J.C., Pourtaheri S. Routine Use of Intraoperative Neuromonitoring During ACDFs for the Treatment of Spondylotic Myelopathy and Radiculopathy Is Questionable: A Review of 15,395 Cases. *Spine (Phila Pa 1976).* 2017; 42(1): 14–19. DOI: 10.1097/BRS.0000000000001662
14. Krause K.L., Cheaney II B., Obayashi J.T., Kawamoto A., Than K.D. Intraoperative neuromonitoring for one-level lumbar discectomies is low yield and cost-ineffective. *J. Clin. Neurosci.* 2020; 71: 97–100. DOI: 10.1016/j.jocn.2019.08.116
15. Chen Y., Wang B.P., Yang J., Deng Y. Neurophysiological monitoring of lumbar spinal nerve roots: A case report of postoperative deficit and literature review. *Int. J. Surg. Case Reports.* 2017; 30: 218–221. DOI: 10.1016/j.ijscr.2016.11.027
16. Iorio C., Koucheiki R., Strantzas S., Vandenberk M., Lewis S.J., Zeller R., Camp M., Rocos B., Lebel D.E. Utility of intraoperative neurophysiological monitoring in detecting motor and sensory nerve injuries in pediatric high-grade spondylolisthesis. *Spine J.* 2023; 23(12): 1920–1927. DOI: 10.1016/j.spinee.2023.08.002
17. Schär R.T., Sutter M., Mannion A.F., Eggspühler A., Jeszenszky D., Fekete T.F., Kleinstück F., Haschtmann D. Outcome of L5 radiculopathy after reduction and instrumented transforaminal lumbar interbody fusion of high-grade L5-S1 isthmic spondylolisthesis and the role of intraoperative neurophysiological monitoring. *Eur. Spine J.* 2017; 26(3): 679–690. DOI: 10.1007/s00586-017-4964-3
18. Lieberman J.A., Lyon R., Jasiukaitis P., Berven S.H., Burch S., Feiner J. The reliability of motor evoked potentials to predict dorsiflexion injuries during lumbosacral deformity surgery: importance of multiple myotomal monitoring. *Spine J.* 2019; 19(3): 377–385. DOI: 10.1016/j.spinee.2018.07.006
19. Wilent W.B., Tesdahl E.A., Harrop J.S., Welch W.C., Cannestra A.F., Poelstra K.A., Eppin-Zapf T., Stivali T., Cohen J., Sestokas A.K. Utility of motor evoked potentials to diagnose and reduce lower extremity motor nerve root injuries during 4,386 extradural posterior lumbosacral spine procedures. *Spine J.* 2020; 20(2): 191–198. DOI: 10.1016/j.spinee.2019.08.013
20. Umair M., Asghar M.R., Jahangiri F.R. The Frequency of Motor Evoked Potential Alerts During Lumbar Spinal Surgeries. *J. Neurophysiol. Monit.* 2023; 1(1): 13–21. DOI: 10.5281/zenodo.10206767
21. Shao J., Lee B.S., Pelle D., Lee M.Y., Savage J., Tanenbaum J.E., Mroz T.E., Steinmetz M.P. Intraoperative Multimodal Monitoring in Pedicle Subtraction Osteotomies of the Lumbar Spine: A Narrative Literature Review. *Clin. Spine Surg.* 2019; 32(4): 137–142. DOI: 10.1097/BSD.0000000000000740
22. Chang R., Reddy R.P., Coutinho D.V., Chang Y.-F., Anetakis K.M., Crammond D.J., Balzer J.R., Thirumala P.D. Diagnostic Accuracy of SSEP Changes During Lumbar Spine Surgery for Predicting Postoperative Neurological Deficit: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Spine.* 2021; 46(24): 1343–1352. DOI: 10.1097/BRS.00000000000004099
23. Melachuri S.R., Kaur J., Melachuri M.K., Ninaci D., Crammond D.J., Balzer J.R., Thirumala P.D. The diagnostic accuracy of somatosensory evoked potentials in evaluating neurological deficits during 1057 lumbar interbody fusions. *J. Clin. Neurosci.* 2019; 61: 78–83. DOI: 10.1016/j.jocn.2018.10.140
24. Melachuri S.R., Stopera C., Melachuri M.K., Anetakis K., Crammond D.J., Castellano J.F., Balzer J.R., Thirumala P.D. The efficacy of somatosensory evoked potentials in evaluating new neurological deficits after spinal thoracic fusion and decompression. *J. Neurosurg. Spine.* 2020; 6: 1–6. DOI: 10.3171/2019.12.SPINE1911157
25. Dou N.-N., Wang H., Hu S.-Z., Huang Z.-N., Zhong J., Li S.-T. Lumbar Endoscopic Unilateral Laminotomy With Bilateral Decompression Surgery in Severe Lumbar Stenosis Under Electrophysiological Monitoring-Focused on Full-Visualized Trepine/Osteotome. *Neurospine.* 2023; 20(3): 1040–1046. DOI: 10.14245/ns.2346624.312
26. Dowlati E., Alexander H., Voyadzis J.-M. Vulnerability of the L5 nerve root during anterior lumbar interbody fusion at L5–S1: case series and review of the literature. *Neurosurg. Focus.* 2020; 49(3): E7. DOI: 10.3171/2020.6.FOCUS20315
27. Choi J., Kim J.-S., Hyun S.-J., Kim H.-J., Deletis V., Park K.S. Intraoperative bulbocavernosus reflex monitoring in posterior lumbar fusion surgery. *Clin. Neurophysiol.* 2022; 144: 59–66. DOI: 10.1016/j.clinph.2022.09.020
28. Ushirozako H., Yoshida G., Kobayashi S., Hasegawa T., Yamato Y., Yasuda T., Banno T., Arima H., Oe S., Mihara Y., Togawa D., Matsuyama Y. Transcranial Motor Evoked Potential Monitoring for the Detection of Nerve Root Injury during Adult Spinal Deformity Surgery. *Asian Spine J.* 2018; 12(4): 639–647. DOI: 10.31616/asj.2018.12.4.639
29. Traba A., Romero J.P., Arranz B., Vilela C. A new criterion for detection of radiculopathy based on motor evoked potentials and intraoperative nerve root monitoring. *Clin. Neurophysiol.* 2018; 129(10): 2075–2082. DOI: 10.1016/j.clinph.2018.07.005
30. Chen Y., Luo C., Wang J., Liu L., Huang B., Li C.-Q., Zhou Y., Chencheng F. Roles of multimodal intra-operative neurophysiological monitoring (IONM) in percutaneous endoscopic

- transforaminal lumbar interbody fusion: a case series of 113 patients. *BMC Musculoskelet Disord.* 2021; 22(1): 989. DOI: 10.1186/s12891-021-04824-2
31. Alluri R.K., Vaishnav A.S., Sivaganesan A., Ricci L., Sheha E., Qureshi S.A. Multimodality Intraoperative Neuromonitoring in Lateral Lumbar Interbody Fusion: A Review of Alerts in 628 Patients. *Global Spine J.* 2023; 13(2): 466–471. DOI: 10.1177/21925682211000321
  32. Alluri R., Mok J.K., Vaishnav A., Shelby T., Sivaganesan A., Hah R., Qureshi S.A. Intraoperative Neuromonitoring During Lateral Lumbar Interbody Fusion. *Neurospine.* 2021; 18(3): 430–436. DOI: 10.14245/ns.2142440.220
  33. Chandra V., Porche K., Murad G.J.A., Polifka A.J. Techniques for psoas navigation in lateral lumbar interbody fusion. *Semin Spine Surg.* 2022; 34(2): 100941. DOI: 10.1016/j.semss.2022.100941
  34. Epstein N.E. More nerve root injuries occur with minimally invasive lumbar surgery, especially extreme lateral interbody fusion: A review. *Surg. Neurol. Int.* 2016; 7(Suppl 3): 83–95. DOI: 10.4103/2152-7806.174895
  35. Alan N., Adams G., Agarwal N., Hamilton D., Miele V.J., Okonkwo D.O., Kanter A.S. 446 Utility of Intraoperative Motor-Evoked Potential in L4-5 Lateral Lumbar Interbody Fusion: 3-Year Prospective Study. *Neurosurgery.* 2022; 68(Suppl 1): 107. DOI: 10.1227/NEU.0000000000001880\_446
  36. Cheruku N. Lateral Lumbar Interbody Fusion and Neuromonitoring: A Concise Report. *J. Spine.* 2021; 10(S2): ISSN: 2165-7939
  37. Sanchez Roldan M.D.L.A., Granizo F., Ofliidis V., Margetis K., Téllez M.J., Ulkatan S., Kimura J. Optimizing the methodology for saphenous nerve somatosensory evoked potentials for monitoring upper lumbar roots and femoral nerve during lumbar spine surgery: technical note. *J. Clin. Monit. Comput.* 2022; 36: 1–7. DOI: 10.1007/s10877-021-00737-6
  38. Silverstein J.W., Block J., Smith M.L., Bombardieri D.A., Sanderson S., Paul J., Ball H., Ellis J.A., Goldstein M., Kramer D.L., Arutyunyan G., Marcus J., Mermelstein S., Slosar P., Goldthwaite N., Lee S.I., Reynolds J., Riordan M., Pirmia M., Kunwar S., Abbi G., Bizzini B., Gupta S., Porter D., Mermelstein L.E. Femoral nerve neuromonitoring for lateral lumbar interbody fusion surgery. *Spine J.* 2022; 22(2): 296–304. DOI: 10.1016/j.spinee.2021.07.017
  39. Jain N., Alluri R., Phan K., Yanni D., Alvarez A., Guillen H., Mnatsakanyan L., Bederman S.S. Saphenous Nerve Somatosensory-Evoked Potentials Monitoring During Lateral Interbody Fusion. *Global Spine J.* 2021; 11(5): 722–726. DOI: 10.1177/2192568220922979
  40. Riley M.R., Doan A.T., Vogel R.W., Aguirre A.O., Pieri K.S., Scheid E.H. Use of motor evoked potentials during lateral lumbar interbody fusion reduces postoperative deficits. *Spine J.* 2018; 18(10): 1763–1778. DOI: 10.1016/j.spinee.2018.02.024
  41. de Carvalho P.S.T., Ramos M.R.F., da Silva Meireles A.C., Peixoto A., de Carvalho P., Ramírez León J.F., Yeung A., Lewandrowski K-U. Feasibility of Using Intraoperative Neuromonitoring in the Prophylaxis of Dysesthesia in Transforaminal Endoscopic Discectomies of the Lumbar Spine. *Brain Sci.* 2020; 10(8): 522. DOI: 10.3390/brainsci10080522
  42. Kim J.H., Lenina S., Mosley G., Meaie J., Tran B., Kim J.S., Cho S.K. The Efficacy of Intraoperative Neurophysiological Monitoring to Detect Postoperative Neurological Deficits in Transforaminal Lumbar Interbody Fusion Surgery. *Oper Neurosurg. (Hagerstown).* 2019; 16(1): 71–78. DOI: 10.1093/ons/opy061
  43. He S., Ren Z., Zhang X., Li J. Neurophysiologic monitoring for treatment of upper lumbar disc herniation with percutaneous endoscopic lumbar discectomy: A case report on the significance of an increase in the amplitude of motor evoked potential responses after decompression and literature review. *Int. J. Surg. Case Reports.* 2020; 67: 271–276. DOI: 10.1016/j.ijscr.2020.01.042
  44. Visser J., Verra W.C., Kuijlen J.M., Horsting P.P., Journée H.L. Recovery of TES-MEPs during surgical decompression of the spine: a case series of eight patients. *J. Clin. Neurophysiol.* 2014; 31(6): 568–574. DOI: 10.1097/WNP.0000000000000099
  45. Fujiwara Y., Manabe H., Izumi B., Tanaka H., Kawai K., Tanaka N. The Efficacy of Intraoperative Neurophysiological Monitoring Using Transcranial Electrically Stimulated Muscle-evoked Potentials (TcE-MsEPs) for Predicting Postoperative Segmental Upper Extremity Motor Paresis After Cervical Laminoplasty. *Clin. Spine Surg.* 2016; 29(4): 188–195. DOI: 10.1097/BSD.0000000000000311
  46. Haghghi S.S., Blaskiewicz D.J., Ramirez B., Zhang R. Can intraoperative neurophysiologic monitoring during cervical spine decompression predict post-operative segmental C5 palsy? *J. Spine Surg.* 2016; 2(3): 167–172. DOI: 10.21037/jss.2016.09.09
  47. Hirahata M., Kitagawa T., Fujita M., Shibo R., Kawano H., Iwai H., Inanami H., Koga H. A Comparative Study on the Minimal Invasiveness of Full-Endoscopic and Microendoscopic Cervical Foraminotomy Using Intraoperative Motor Evoked Potential Monitoring. *Medicina.* 2020; 56(11): 605. DOI: 10.3390/medicina56110605
  48. Wi S.M., Lee H.-J., Kang T., Chang S.Y., Kim S.-M., Chang B.-S., Lee C.-K., Kim H. Clinical Significance of Improved Intraoperative Neurophysiological Monitoring Signal during Spine Surgery: A Retrospective Study of a Single-Institution Prospective Cohort. *Asian Spine J.* 2020; 14(1): 79–87. DOI: 10.31616/asj.2019.0025
  49. Reddy R.P., Chang R., Rosario B.P., Sudadi S., Anetakis K.M., Balzer J.R., Crammond D.J., Shaw J.D., Thirumala P.D. What is the predictive value of intraoperative somatosensory evoked potential monitoring for postoperative neurological deficit in cervical spine surgery, a meta-analysis. *Spine J.* 2021; 21(4): 555–570. DOI: 10.1016/j.spinee.2021.01.010
  50. Reddy R.P., Singh-Varma A., Chang R., Vedire A., Anetakis K.M., Balzer J.R., Crammond D.J., Shandal V., Lee J.Y., Shaw J.D., Thirumala P.D. Transcranial Motor Evoked Potentials as a Predictive Modality for Postoperative Deficit in Cervical Spine Decompression Surgery – A Systematic Review and Meta-Analysis. *Global Spine J.* 2023; 11–20. DOI: 10.1177/21925682231219224

#### Сведения об авторах:

**Гулаев Евгений Владимирович** — аспирант кафедры неврологии и нейрохирургии Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Ивановский государственный медицинский университет» Министерства здравоохранения Российской Федерации; научный сотрудник лаборатории нейрорегенерации Федерального государственного бюджетного учреждения «Федеральный центр мозга и нейротехнологий» Федерального медико-биологического агентства; <https://orcid.org/0000-0002-3464-8927>

**Баклаушев Владимир Павлович** — доктор медицинских наук, доцент, заместитель директора по науке Федерального государственного бюджетного учреждения «Федеральный центр мозга и нейротехнологий» Федерального медико-биологического агентства; <https://orcid.org/0000-0003-1039-4245>

**Линьков Вячеслав Викторович** — доктор медицинских наук, профессор, заведующий кафедрой неврологии и нейрохирургии Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Ивановский государственный медицинский университет» Министерства здравоохранения Российской Федерации.