

DOI: <https://doi.org/10.63769/1683-3295-2026-28-1-119-129>

Особенности проведения интраоперационного нейрофизиологического мониторинга при хирургии вестибулярных шванном. Обзор литературы

Контакты:

Татьяна Владимировна
Козлова
kozlovatv_dr@mail.ru

Т.В. Козлова, А.А. Зувев

ФГБУ «Национальный медико-хирургический центр им. Н.И. Пирогова» Минздрава России; Россия, 105203
Москва, ул. Нижняя Первомайская, 70

Вестибулярные шванномы – одни из самых распространенных новообразований в области мостомозжечкового угла. Современный уровень хирургической техники обеспечивает крайне низкий уровень летальности (менее 0,5 %), но послеоперационные неврологические расстройства, особенно нарушение функции мимической мускулатуры и потеря слуха со стороны расположения опухоли, являются довольно частыми осложнениями. Лечение пациентов с такими опухолями требует применения интраоперационного нейромониторинга.

Цель работы – анализ разных методов интраоперационного нейромониторинга при хирургии вестибулярных шванном с оценкой функционального состояния лицевого нерва в послеоперационном периоде, а также прогностической значимости каждого из методов.

Поиск научных источников осуществляли в информационных системах и базах данных PubMed, Cochrane Library, MedLine. Критерии включения: подробные описания методов интраоперационного нейромониторинга при хирургии вестибулярных шванном. Критерий исключения – отсутствие описания нейрофизиологических методов при хирургии вестибулярных шванном. Срок давности источников – 20 лет.

Ключевые слова: нейромониторинг, вестибулярная шваннома, нейрофизиологический мониторинг

Для цитирования: Козлова Т.В., Зувев А.А. Особенности проведения интраоперационного нейрофизиологического мониторинга при хирургии вестибулярных шванном. Обзор литературы. Нейрохирургия 2026;28(1):119–29.

DOI: <https://doi.org/10.63769/1683-3295-2026-28-1-119-129>

Intraoperative neurophysiological monitoring in surgery of vestibular schwannomas (literature review)

T.V. Kozlova, A.A. Zuev

National Medical and Surgical Center named after N.I. Pirogov, Ministry of Health of Russia; 70 Nizhnyaya Pervomayskaya St., Moscow 105203, Russia

Contacts: Tatyana Vladimirovna Kozlova kozlovatv_dr@mail.ru

Vestibular schwannomas are one of the most common tumors of the cerebellopontine angle area. Current level of surgical technique provides very low mortality rate (less than 0.5 %) but postoperative neurological deficits, specifically facial musculature dysfunction and hearing loss on the side of the tumor, are quite frequent complications. Treatment of patients with these tumors requires intraoperative neuromonitoring.

Aim. To analyze different methods of intraoperative neuromonitoring in surgery of vestibular schwannomas with evaluation of functional condition of the facial nerve in the postoperative period, as well as prognostic significance of each method. The search for scientific sources was performed in the PubMed, Cochrane Library, MedLine databases. Inclusion criterion: detailed descriptions of intraoperative neurophysiological monitoring techniques in surgery of vestibular schwannomas. Exclusion criterion: absence of description of neurophysiological monitoring techniques in surgery of vestibular schwannomas. Sources not older than 20 years were selected.

Keywords: neuromonitoring, vestibular schwannoma, neurophysiological monitoring

For citation: Kozlova T.V., Zuev A.A. Intraoperative neurophysiological monitoring in surgery of vestibular schwannomas [literature review]. *Neyrokhirurgiya = Russian Journal of Neurosurgery* 2026;28(1):119–29.

DOI: <https://doi.org/10.63769/1683-3295-2026-28-1-119-129>

ВВЕДЕНИЕ

Вестибулярные шванномы (ВШ) — одни из самых распространенных новообразований в области мостомозжечкового угла. Лечение пациентов с такими опухолями требует применения мультидисциплинарного подхода [1]. В качестве 3 основных тактик лечения больных с ВШ предложены микрохирургическое удаление опухоли, радиохирurgia и динамическое наблюдение [2]. Каждый из методов обладает преимуществами и недостатками, выбор оптимальной тактики определяется совокупностью факторов, включая размеры опухоли, темпы ее роста и неврологический статус пациента до операции [3, 4].

Несмотря на широкое распространение радиохирургических методов, хирургическое вмешательство остается предпочтительным подходом при опухолях диаметром более 3 см, а также при наличии компрессии ствола головного мозга, прогрессирующих неврологических нарушений или неэффективности динамического наблюдения [3, 4]. Современный уровень хирургической техники обеспечивает крайне низкие показатели летальности (менее 0,5 %); послеоперационные неврологические расстройства, особенно нарушение функции мимической мускулатуры и потеря слуха со стороны расположения опухоли, являются довольно частыми осложнениями [5].

Лицевой нерв (ЛН) при ВШ крупных размеров часто оказывается смещенным, растянутым или сдавленным опухолью, что значительно затрудняет его визуальную идентификацию и увеличивает вероятность травматизации в ходе хирургического вмешательства [6]. Нарушение функции ЛН, проявляющееся параличом мимической мускулатуры, — одно из наиболее распространенных осложнений, которое, по данным разных исследований, возникает в 4,8–41,0 % случаев и может носить стойкий характер [7–9].

Прогресс в области нейрофизиологических технологий и развитие микрохирургических подходов привели к существенному снижению частоты осложнений за счет внедрения интраоперационного нейрофизиологического мониторинга (ИОНМ). С момента клинического внедрения в 1970–1980-х годах ИОНМ стал неотъемлемым элементом хирургии опухолей мостомозжечкового угла, в частности ВШ [2, 10–12]. Интраоперационный нейрофизиологический мониторинг позволяет своевременно идентифицировать черепно-мозговую нерв (ЧМН) во время операции, особенно ЛН, оценить степень механического воздействия в режиме реального времени, улучшить исходы в функцио-

нальном статусе пациентов после операции [2, 12]. Все это способствует изменению стратегии лечения ВШ в пользу более радикального удаления опухоли с сохранением функции ЛН и слухового нерва (СН) [13].

Проведен нарративный обзор в соответствии с рекомендациями SANRA [14]. Найдено и проанализировано 77 статей по запросам *neuromonitoring, vestibular schwannomas, neurophysiology monitoring* с максимальным числом наблюдений за последние 20 лет с использованием PubMed, Cochrane library, MedLine и доступных средств поиска в Интернете. Критерии включения: подробные описания методов ИОНМ при хирургии ВШ. Критерий исключения — отсутствие описания нейрофизиологических методов при хирургии ВШ.

МЕТОДЫ ИНТРАОПЕРАЦИОННОГО НЕЙРОМОНИТОРИНГА ПРИ ХИРУРГИИ ВЕСТИБУЛЯРНЫХ ШВАННОМ

Интраоперационный нейрофизиологический мониторинг — ключевой элемент нейрохирургического вмешательства при удалении ВШ, обеспечивающий сохранность функционального состояния черепных нервов. Современные протоколы ИОНМ при операциях в области мостомозжечкового угла основаны на применении электрофизиологических методов, позволяющих в режиме реального времени регистрировать нейронную активность и выявлять признаки потенциального повреждения [15].

Стандартной анестезиологической схемой для проведения мониторинга является тотальная внутривенная анестезия с исключением или значительным ограничением использования миорелаксантов, что обеспечивает адекватную интерпретацию двигательных и сенсорных вызванных потенциалов [15].

Сохранение функции ЛН — одна из ключевых задач при резекции ВШ. По мнению ряда авторов, ИОНМ ЛН должен применяться при любом хирургическом вмешательстве по поводу ВШ вне зависимости от объема образования, однако его значение особенно велико при резекции опухолей, вызывающих выраженную деформацию нервных структур [10, 11, 16]. Зачастую из-за сильной компрессии ЛН при гигантских ВШ деформированные и растянутые ЛН и СН невозможно отличить от тяжелой арахноидальной оболочки. Повреждение ЛН может возникнуть на любом этапе удаления опухоли и может быть связано как с прямым механическим воздействием, так и с растяжением или термической травмой [11].

В целях проведения ИОНМ ЛН многие авторы устанавливают электроды для записи моторных

вызванных потенциалов (МВП) в *m. orbicularis oculi*, *m. orbicularis oris* и *m. mentalis* на ипсилатеральной стороне [17–19]. L. P. Li и соавт. сообщают, что эмпирически существует 2 возможных обоснования для установки электродов. Первое – размещение электродов в мышцы, повреждение которых вызовет наиболее отрицательное функциональное или косметическое воздействие. Второе – электроды следует поместить в мышцы, которые с наибольшей вероятностью будут генерировать сигналы электромиографии (ЭМГ) на заданный стимул. С учетом того, что основной целью ИОНМ ЛН является предотвращение травмы всех ветвей, а не смягчение травмы отдельных ветвей, 2-й подход представляется более логичным, и в идеале электроды должны располагаться более чем в 2 мышцах лица, по крайней мере один из них должен располагаться в круговой мышце глаза [20]. Некоторые авторы не рекомендуют в качестве исследуемой мышцы использовать *m. orbicularis oculi* в связи с ее близким расположением к стимулятору и большой вероятностью получения артефакта от стимулирующего импульса [21]. J. Prell и соавт. сообщают, что в качестве контроля в их работах всегда включена хотя бы одна ипсилатеральная мышца конечности [22]. J. Sarnthein и соавт. рекомендуют использовать *m. nasalis* [23]. C. C. Dong и соавт., R. F. Hardian и соавт., помимо *m. orbicularis oris*, *m. orbicularis oculi*, дополнительно устанавливают электроды в *m. frontalis* [24, 25].

Методы ИОНМ ЛН при хирургии ВШ подразделяются на 2 категории: картирование для идентификации хода ЛН и непрерывный мониторинг для оценки его функционального состояния в процессе операции.

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ЛИЦЕВОГО НЕРВА. ПРЯМАЯ СТИМУЛЯЦИЯ НЕРВА

Прямая стимуляция нерва (ПСН) применяется при визуально недоступной или деформированной анатомии. Метод позволяет определить топографию ЛН и подтвердить его проводимость [26].

Основная задача ПСН – поиск и локализация VII ЧМН на капсуле опухоли с последующим определением его хода в случае затрудненной визуализации или диссекции через арахноидальную мембрану [1, 9].

Для ПСН используют монополярную или концентрическую биполярную коаксиальную низкочастотную стимуляцию постоянным током [16, 27]. J. M. Kartush и соавт. полагают, что слишком высокий уровень монополярной стимуляции может привести к ложноположительному результату из-за распространения тока к более дистальному сегменту нерва. В связи с этим авторы используют биполярный либо монополярный стимулятор с низкой или умеренной интенсивностью тока [28]. Используемая сила стимула – 0,01–0,5 мА; длительность стимула – 0,2 мс; частота стимуляции – 1–4 Гц; диапазон фильтров – 20–3000 Гц [16, 27, 29, 30]. При наличии соответствующего тканевого барьера между электродом и нервом или увеличении расстоя-

ния до ЧМН может возникнуть потребность в увеличении силы стимула. Причем более интенсивный моторный ответ при меньшей силе стимуляции указывает на то, что хирург работает ближе к ЧМН [15]. Интенсивность ПСН регулируют с шагом 0,01 мА при силе тока <0,1 мА и шагом 0,05 при силе тока >0,1 мА [31].

Некоторые авторы используют динамическую монополярную прямую стимуляцию при больших опухолях, поскольку она менее фокусна, чем биполярная, которая более специфична для идентификации черепных нервов. Это позволяет использовать конфигурацию электрического поля как электрическую радарную систему [27, 32]. Динамическую монополярную стимуляцию проводят с использованием стандартного аспиратора с возможностью монополярного картирования, параметры нейрофизиологической стимуляции идентичны параметрам классического картирования с помощью монополярного или биполярного (концентрического) зонда. Первоначально интенсивность стимуляции устанавливают в пределах 0,2–2 мА, при дальнейшей идентификации нерва параметры снижают (с шагом 0,1 мА до достижения 0,1 мА, затем с шагом 0,05 мА). В противоположность этому, когда сигнал от ЛН исчезает во время диссекции, интенсивность увеличивают до 2 мА [27, 32]. K. Seidel и соавт. считают, что непрерывное монополярное картирование помогает поддерживать безопасное расстояние в несколько миллиметров от ЛН и при этом добиться максимальной резекции без последующего неврологического дефицита [27].

Дополнительной возможностью ПСН является оценка сохранности проведения по VII ЧМН. По завершении удаления опухоли для оценки сохранности функции ЛН проводят заключительную ПСН проксимальной части нерва при минимальной силе тока, достигающей до 0,01 мА [33]. По некоторым данным, наблюдается значимая корреляция послеоперационной функции ЛН с минимальной силой ПСН, что указывает на хорошее прогностическое значение данных стимуляции [12, 31, 33]. Отсутствие М-волны при стимуляции проксимальной части нерва, несмотря на сохраненный ответ в дистальной части, может указывать на интраоперационное повреждение ЧМН [8, 17]. В. А. Neff и соавт., M. F. Shamji и соавт. продемонстрировали, что порог стимуляции $\leq 0,05$ мА и амплитуда ответа ≥ 240 мВ соответствовали положительному исходу функции ЛН (1 или 2 балла по шкале Хауса–Бракманна) с вероятностью 98 % через 2 года после операции [34, 35]. По данным некоторых авторов, при минимальной силе тока 0,1 мА чувствительность составила 76 %, специфичность – 68 % для оценки функции лица в отсроченном послеоперационном периоде, а при 0,05 мА чувствительность составила 73 %, специфичность – 74 % [36]. По другим данным, чувствительность и специфичность низкотоковой стимуляции для прогнозирования хорошего исхода функции

ЛН составили 87,2 и 48 % соответственно [31]. Заключение ПСН можно отнести не только к идентификации ЛН, но и к методу, позволяющему оценить его повреждение.

ОЦЕНКА СОХРАННОСТИ ЛИЦЕВОГО НЕРВА

Мониторинг ЛН – непрерывное наблюдение за функциональным состоянием ЛН, позволяющее предотвратить или оценить повреждение нерва. Мониторинг включает следующие модальности: кортикобульбарные моторные вызванные потенциалы (КБ-МВП), спонтанная ЭМГ.

Кортикобульбарные моторные вызванные потенциалы

Кортикобульбарные моторные вызванные потенциалы позволяют оценить состояние всей нисходящей цепи от моторной коры до ЛН. Это особенно важно при ограниченной применимости прямой электрической стимуляции на ранних этапах резекции опухоли [15, 16, 18].

Для мониторинга КБ-МВП ряд авторов придерживаются расположения электродов для стимуляции в коже головы в позиции C3/C4 и Cz (катод) по международной системе 10–20. Анод располагали на контралатеральной стороне [8, 16, 18, 37]. Преимущества данного способа J. Sarnthein и соавт. объясняют уменьшением двигательного артефакта в результате движения шеи [23]. С.С. Dong и соавт. используют бифазную стимуляцию через электроды, установленные в точках C3–C4, что позволяет стимулировать распространенный участок моторной коры, однако существует вероятность вызвать периферический ответ [24]. S.M. Verst и соавт. показали, что возможна стимуляция через точки C5–Cz/C6–Cz, но разница в воспроизводимости ответов при сравнении результатов с использованием монтажей C5/C6–Cz и C3/C4–Cz незначительна [38].

Кортикобульбарные моторные вызванные потенциалы регистрируют на всем этапе резекции ВШ. Наибольшую абсолютную амплитуду ответа, полученного до вскрытия твердой мозговой оболочки, определяют как базовое значение. Для дальнейшего анализа рассчитывают соотношение начальной и конечной амплитуды КБ-МВП [8, 16, 18, 37].

В данном методе используют многоимпульсную транскраниальную электрическую стимуляцию: подают короткую серию стимулов (3–5) с длительностью импульса 200–500 мкс, межстимульным интервалом 1–2 мс; по данным ряда авторов, частота повторения пачки стимула составляет 2 Гц, сила тока – до 150 мА [8, 16, 18, 23, 37]. При транскраниальной электрической стимуляции возможна активация периферической части черепных нервов, поэтому для дифференциации центрального и периферического ответов через 40–90 мс после серии импульсов основных стимулов рекомендовано подавать единичный стимул [23,

24, 39]. Показано, что только серией коротких стимулов можно активировать кору головного мозга и кортикобульбарный тракт, а единичным стимулом активируют периферическую часть нерва [24, 40]. Для сведения к минимуму движений головы пациента при транскраниальной электрической стимуляции используют низкую интенсивность, но более высокую частоту повторений стимуляции (до 2–3 Гц). Тем самым достигается эффект фасилитации кортикобульбарного тракта, в результате чего генерируются более высокая амплитуда и более стабильные импульсы при низкой интенсивности стимуляции [41].

Критерии повреждения разнятся: некоторые авторы указывают, что полная утрата или снижение амплитуды КБ-МВП более чем на 50 % от исходного уровня является предупреждающим интраоперационным изменением, указывающим на потенциальное нарушение функции ЛН в раннем и отсроченном послеоперационных периодах [8, 18, 42]. По некоторым данным, исчезновение КБ-МВП коррелирует с плохой функцией ЛН в раннем послеоперационном периоде и длительным прозопарезом. Значительные изменения, но не исчезновение КБ-МВП приводят к парезу лица сразу после операции, который может регрессировать в отсроченном послеоперационном периоде [37]. M. Fukuda и соавт. подтверждают прогностический порог на уровне 50 % [43, 44]. Однако есть авторы, обнаружившие, что прогностическое значение метода отсутствует в раннем послеоперационном периоде, а связь с изменениями параметров КБ-МВП и функцией ЛН по шкале Хауса–Бракманна существует только в отдаленном послеоперационном периоде [45].

С.С. Dong и соавт. определили, что сохранение 50 % амплитуды КБ-МВП показало 100 % чувствительность и 88 % специфичность; 35 % от исходной амплитуды – 91 % чувствительность и 97 % специфичность; полное исчезновение МВП – 64 % чувствительность и 100 % специфичность [24]. I. Fernández-Conejero и соавт. показали, что пороговое значение 65 % для снижения амплитуды КБ-МВП имеет чувствительность 89 % и специфичность 99 % [41].

Другая группа авторов использует метод пороговой стимуляции (постепенно подобранная сила тока, при которой регистрируется адекватный ответ амплитудой более 20 мкВ) и считает за критерий повреждения нерва изменение пороговой силы стимуляции [23, 46, 47]. По их мнению, данный метод является более чувствительным и реагирует на повреждение раньше стимуляции. По мнению J. Sarnthein и соавт., увеличение пороговой стимуляции на 20 мА и более коррелировало с ранним послеоперационным ухудшением функции ЛН; чувствительность данного метода составила 88 %, специфичность – 82 % [23]. T. Goto и соавт. показали, что при увеличении порога стимуляции на 30 В чувствительность и специфичность метода в прогнозировании нарушения функции ЛН в раннем

послеоперационном периоде составили 91,3 и 98,6 %, а при увеличении на 75 В – 100 и 98,8 % соответственно для прогнозирования функции ЛН в отсроченном послеоперационном периоде [47].

Спонтанная электромиография

Спонтанная ЭМГ представляет собой модальность непрерывного мониторинга, регистрирующую патологическую активность в ответ на механическое, термическое или ишемическое раздражение ЛН [48]. Метод позволяет детектировать угрозу аксонального повреждения в режиме реального времени до появления макроскопических признаков нарушения целостности нерва.

Под нейротоническими разрядами понимают устойчивую высокочастотную активность по данным ЭМГ; эти потенциалы морфологически неоднородны, и их следует отличать от артефактной активности. Нейротонические разряды могут возникать и без механического повреждения нерва, например при орошении холодной водой операционного поля, особенно в случае частичного повреждения ЧМН. Артефактная активность может быть вызвана как применением различных электрических устройств в операционной, так и случайными движениями игольчатого электрода, а также использованием коагуляции и ультразвуковой аспирации [12, 26].

R. L. Prass и H. Lüders выделили основные паттерны ЭМГ: спайки, вспышки и трейны (A, B, C) [49]. Спайки представляют собой четко выраженные потенциалы с одним большим пиком амплитудой <2000 мкВ, возникающие поодиночке и непрерывно в течение >100 мкс. Спайки резко возникают и снижаются до изолинии. Вспышки представляют собой изолированные комплексы веретенообразной формы, состоящие из наложенных друг на друга спайков, амплитудой до 5000 мкВ и возникают каждые 100–200 мс. Длительность периода от более постепенного начала вспышки до его окончания гораздо больше, чем у спайков (рис. 1).

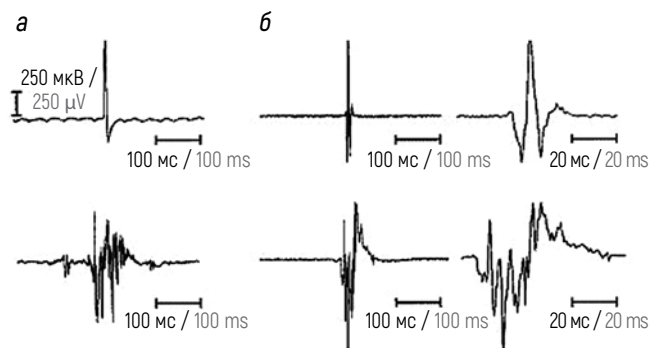


Рис. 1. Пример вспышек (а) и спайков (б) [12]

Fig. 1. Example of bursts (a) and spikes (б) [12]

Термин train был введен для обозначения устойчивой периодической ЭМГ-активности, которая длится несколько секунд [12, 49, 50]. A-train – выраженная ЭМГ волна синусоидальной формы с амплитудой в диапазоне 100–200 мВ, частотой 60–210 Гц и длительностью от миллисекунд до нескольких секунд. B-train – регулярная или нерегулярная последовательность одиночных компонентов с максимальными интервалами 500 мс, длительностью до нескольких минут или даже часов. По преобладающим компонентам можно выделить B-train со спайками и B-train со вспышками. C-train характеризуется продолжительной нерегулярной ЭМГ-активностью, состоящей из многочисленных чередующихся паттернов, амплитуда которых варьирует от 20 до 500 мВ. Спайки, вспышки, B- и C-train возникают в периодах между разрезом кожи и вскрытием твердой мозговой оболочки, хотя прямого механического раздражения нерва в этот момент не происходит. Данные типы ЭМГ-активности широко распространены и не имеют корреляции с послеоперационным парезом мимических мышц (рис. 2) [12].

Наиболее важной с клинической точки зрения серией нейротонических разрядов является A-train – синусоидальный паттерн, состоящий из последовательности минимум 4 геометрически подобных,

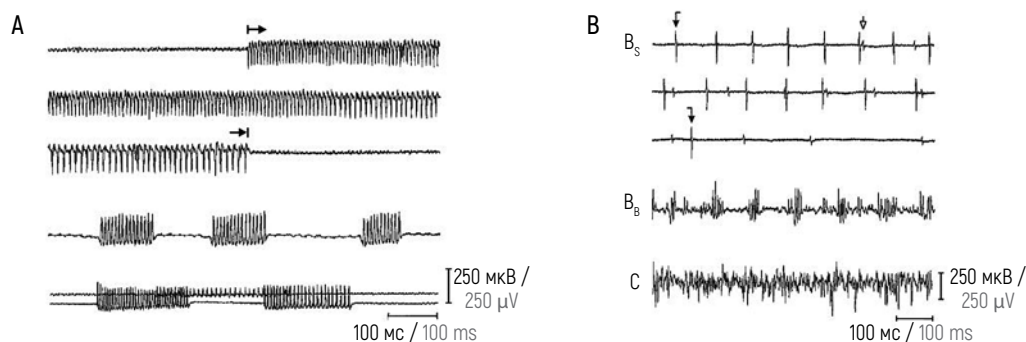


Рис. 2. Примеры электромиографической активности A-train, B-train, C-train [12]

Fig. 2. Examples of electromyographic activities: A-train, B-train, C-train [12]

от моно- до трифазных, высокочастотных (100–200 Гц) разрядов с амплитудой по крайней мере вдвое выше фонового шума [18, 49, 50]. Считается, что данный паттерн коррелирует с повреждением аксонов и, как следствие, развитием послеоперационного неврологического дефицита [51]. J. Prell и соавт. считают, что продолжительность паттерна A-train >10 с по данным спонтанной ЭМГ тесно связана с плохим прогнозом в функции ЛН после операции [52]. Чувствительность и специфичность данного метода составили 86 и 89 % соответственно [12, 52].

ИНТРАОПЕРАЦИОННЫЙ НЕЙРОФИЗИОЛОГИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ СЛУХОВОГО НЕРВА

Интраоперационный мониторинг СН используют во время операции по удалению ВШ при попытке сохранить слух. Данная рекомендация относится к взрослым пациентам, которым проводят операцию по удалению ВШ с измеримым до операции уровнем слуха и опухолью размером <1,5 см [53].

В отличие от мониторинга ЛН роль ИОНМ в сохранении слуха менее четко определена и данный метод нейромониторинга не используют повсеместно, что может быть связано с техническими сложностями в его проведении [53]. По мнению некоторых авторов, любой остаточный слух у пациентов с ВШ (классы I–IV по шкале Гарднера–Робертсона) требует записи акустических стволовых вызванных потенциалов (АСВП), чтобы повысить шансы сохранения СН [54]. Для нейромониторинга слуховой функции могут использоваться как АСВП, так и ПСН непосредственно СН [55].

Акустические стволовые вызванные потенциалы регистрируют в ответ на стимуляцию ипсилатерального уха. Техника записи АСВП при ИОНМ и интерпретация получаемых данных отличаются от таковых при экстраоперационных диагностических исследованиях АСВП, так как во время операции режим анестезии, интенсивность подаваемого стимула и множество других факторов будут различаться от пациента к пациенту. Таким образом, во время операции АСВП постоянно сравнивают с зарегистрированными ранее данными у этого же пациента [56]. После индукции общей анестезии наушник с пластиковой трубкой помещают внутрь слухового прохода. Для получения АСВП референтный электрод устанавливают в точке Cz по международной системе 10–20, а заземляющий электрод – в области лба. Иглы, подключенные к отрицательному каналу дифференциального усилителя, устанавливают в области сосцевидных отростков [26, 56].

Кратковременный щелчок или тон подают с интенсивностью 80–100 дБ и частотой 19–21 Гц. Базовую линию для каждого уха регистрируют до начала операции и используют в качестве исходных данных на протяжении всего исследования. Акустические стволовые вызванные потенциалы представляют собой сложные полифазные волны с различными компонентами по-

тенциалов. Классический АСВП состоит из 5–7 пиков, каждый из которых возникает в течение 6–10 мс после щелчка; первые 5 пиков (волны I–V) являются основными в клинической практике: I – улитковый нерв; II – зона входа корешка в ствол головного мозга; III – ядерный комплекс моста; IV – верхняя олива; V – латеральная петля [26]. Волны IV и V генерируются в верхних отделах головного и нижних отделах среднего мозга. Волна V, как правило, наиболее устойчива и наиболее тщательно отслеживается во время операции. Хирург получает сигнал тревоги, если изменение латентности волны V превышает 0,5 мс или если происходит изменение или исчезновение любой волны [53].

По данным A. D. Legatt, у пациентов с ВШ можно наблюдать большое разнообразие паттернов АСВП, причем вероятность записи аномальных АСВП тем выше, чем больше размер опухоли. По мере роста опухоли она постепенно сдавливает СН, что вначале приводит к удлинению межпикового интервала I–III, а в итоге – к полной эрадикации волны III и последующих компонентов АСВП. Воздействие на волну I может отражать сдавление внутренней слуховой артерии, вызывающее ишемию и дисфункцию улитки. Удлинение межпикового интервала III–V в ответ на стимуляцию уха, контралатеральной опухоли, свидетельствует о сдавлении ствола головного мозга, что бывает при крупных ВШ. Как и при спонтанной ЭМГ ЛН, запись АСВП позволяет выявить любое механическое/термическое повреждение СН, однако с некоторой задержкой. Интраоперационная травматизация слуховых путей обычно вызывает изменения амплитуды раньше, чем изменения латентности, а в некоторых случаях компоненты АСВП ослабевают и исчезают без существенного изменения латентности. Типичными пороговыми критериями выявления неблагоприятного изменения АСВП являются уменьшение на 50 % амплитуды компонента (чаще всего волны V) или увеличение на 1 мс абсолютной латентности волны V или межпикового интервала I–V. Многие другие интраоперационные факторы могут вызывать изменения в записываемых АСВП. Воздействие бора, холодной ирригации, изменение системной перфузии также могут влиять на результаты [55, 56]. Из-за сложностей интерпретации в связи с большим количеством артефактов споры о полезности интраоперационных АСВП продолжают [26].

Использование ПСН СН также описано в ряде работ по ИОНМ при хирургии ВШ, однако, по мнению группы авторов, данный метод довольно затруднителен по ряду технических причин: необходимости размещения электродов в зоне выхода корешка нерва перед резекцией опухоли, сложности фиксации датчиков к нерву и удержании их на одном месте на протяжении всей операции [53, 55]. В исследованиях A. S. Youssef, A. E. Downes не получено убедительных доказательств увеличения процента сохранения слуха

при интраоперационном мониторинге кохлеарного нерва. Основным преимуществом является возможность прогнозирования исхода у тех пациентов, у которых реакция снижена в конце операции [54].

ОСОБЕННОСТИ ИНТРАОПЕРАЦИОННОГО НЕЙРОФИЗИОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ПРИ УДАЛЕНИИ ГИГАНТСКИХ ВЕСТИБУЛЯРНЫХ ШВАННОМ

Гигантские ВШ (>3 см) часто приводят к компрессии и смещению множества черепных нервов и ствола мозга. В этих случаях ИОНМ приобретает мультикомпонентный характер с включением дополнительных модальностей:

- ПСН ЧМН (V–XII);
- транскраниальные моторные вызванные потенциалы (ТК-МВП);
- АСВП.

Прямая стимуляция черепно-мозгового нерва

Прямая стимуляция нерва – модальность ИОНМ, используемая для идентификации черепных нервов с помощью электрического стимулирующего зонда. Вестибулярные шванномы гигантских размеров чаще всего сдвигают естественные анатомические ориентиры, и удаление таких опухолей без дополнительных методов контроля ЧМН проблематично. Поэтому в современной нейрохирургии метод картирования черепных нервов является общепринятым стандартом при проведении операций в области ствола головного мозга [37, 40]. Рекомендуется использовать монополярный или биполярный коаксиальный стимулятор с длительностью стимула 0,2 мс, частотой стимуляции 1–4 Гц, фильтрами в диапазоне 20–3000 Гц [29, 57].

Возле верхнего полюса опухоли обычно идентифицируют тройничный нерв, записывающий электрод обычно располагают в жевательной мышце. Отводящий нерв иногда обнаруживают по верхнемедиальному полюсу опухоли; регистрирующий электрод расположен в латеральной прямой мышце глаза, а возле нижнего полюса идентифицируют каудальную группу ЧМН (IX–XII); регистрирующие электроды располагают в задней стенке глотки, голосовой мышце, трапецевидной мышце, мышцах корня языка. Для мониторинга X ЧМН может использоваться специальная эндотрахеальная трубка со встроенными электродами [37, 40, 54].

Транскраниальные моторные вызванные потенциалы

Мониторинг ТК-МВП позволяет оценивать функцию кортикоспинального тракта в течение операции [58, 59].

Транскраниальная электрическая стимуляция активирует двигательные нейроны прецентральной извилины, вызывая потенциал действия, распространяющийся по кортикоспинальному тракту к мотоней-

ронам спинного мозга. Из-за вариабельности порогов активации альфа-мотонейронов в спинном мозге при каждом нисходящем электрическом стимуле, распространяющемся по кортикоспинальному тракту, возникают МВП, которые могут значительно различаться по форме и амплитуде волны, морфологии. Регистрация МВП осуществляется при следующих параметрах стимуляции: серия 5–7 импульсов, длительность импульса – 500 мкс, частота – 250–500 Гц. Интенсивность стимула, требующаяся для эффективной транскраниальной электрической стимуляции, значительно различается у пациентов, и необходима индивидуальная настройка для получения наилучшего ответа без чрезмерной мышечной активации. В качестве целевых мышц для регистрации МВП от кортикоспинального тракта обычно используют двуглавую мышцу плеча; короткую мышцу, отводящую большой палец; переднюю большеберцовую мышцу; квадрицепс; мышцу, отводящую большой палец стопы [26]. Стимулирующие электроды устанавливают на 1–3 см кпереди от С3/С4 по международной системе 10–20 [60].

Базовую линию устанавливают после вскрытия твердой мозговой оболочки. Форму волны МВП оценивают по латентности и амплитуде. Для ТК-МВП критерием тревоги является снижение амплитуды на 50 % и/или удлинение латентности. По данным разных авторов, чувствительность метода составляет 90–95 %, специфичность колеблется в пределах 70–75 % [61, 62]. Данные параметры иногда могут давать ложноположительные результаты без послеоперационного ухудшения двигательных функций. По мнению некоторых авторов, постоянный новый дефицит чаще всего возникает только после необратимого полного падения МВП [59, 61, 63].

Поскольку обратимое снижение МВП практически никогда не предполагает полного отказа от резекции, а вызывает в основном временные остановки хирургических манипуляций, считается, что отсутствие полного снижения МВП может свидетельствовать о том, что пациент не будет испытывать двигательного неврологического дефицита в краткосрочном и долгосрочном периодах [61].

Метод ТК-МВП от мышц конечностей может использоваться при хирургии ВШ с компрессией ствола головного мозга для контроля целостности кортикоспинального тракта.

Акустические стволовые вызванные потенциалы

При больших опухолях, вызывающих компрессию ствола мозга, в случае отсутствия нормального ипсилатерального слуха АСВП могут регистрироваться на контралатеральном ухе в качестве показателя функции ствола мозга [54]. У пациентов с крупными опухолями в области ствола головного мозга могут наблюдаться изменения АСВП. Они включают изменение как латентности, так и амплитуды волны V, хотя

большинство из них наблюдается в амплитуде. Поскольку манипуляции с этими опухолями затрагивают ствол мозга на уровне или выше верхнего оливарного комплекса, изменения будут наиболее очевидны и отражены в волне V. Стойкое снижение амплитуды более чем на 50 % волны V и/или стойкое увеличение абсолютной латентности пика волны $V \geq 0,5$ мс можно считать клинически значимым [64].

ПРОГНОСТИЧЕСКАЯ ЗНАЧИМОСТЬ ИНТРАОПЕРАЦИОННОГО НЕЙРОФИЗИОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА

Касательно прогностического значения интраоперационно получаемых нейрофизиологических данных в литературе имеются разрозненные данные. По мнению группы авторов, наблюдается значимая корреляция послеоперационной функции ЛН с минимальной силой стимула при ПСН проксимальной части ЛН после удаления опухоли, что указывает на хорошее прогностическое значение данных стимуляции [12, 31, 33]. Отсутствие М-ответа при стимуляции проксимальной части нерва, несмотря на сохраненный ответ в дистальной части, может указывать на интраоперационное повреждение ЧМН [8, 17]. В. Frigeni и соавт., В.А. Neff и соавт., М.Ф. Shamji и соавт. сообщают, что проксимальная стимуляция с низким порогом (0,05–0,1 мА) коррелирует с благоприятными исходами [17, 34, 35]. Однако Е.Х. Vivas и соавт. отмечают, что отсутствие положительного ответа на ПСН с низким порогом при анатомически неповрежденном ЛН не позволяет достоверно предсказать ухудшение функции нерва в долгосрочной перспективе [53]. По данным метаанализа, пороговая сила тока при проксимальной стимуляции 0,05–0,10 мА указывает на хорошую функциональную сохранность ЛН, в то время как пороговое значение силы тока 0,2–1,0 мА может являться предиктором его повреждения и нарушения функции [65].

Метод КБ-МВП продемонстрировал высокую прогностическую ценность на основании соотношения амплитуд потенциалов до и после операции касательно краткосрочных и долгосрочных последствий функции ЛН после операций [8, 16, 18, 24, 66, 67]. Исчезновение КБ-МВП коррелирует с потенциальным нарушением функции ЛН сразу после операции и длительным прозопарезом [18, 43, 44]. Снижение амплитуды на 35–50 % и более от исходного уровня приводит к парезу лица сразу после операции, кото-

рый может регрессировать в отсроченном послеоперационном периоде [24, 37, 41, 42]. Однако некоторые авторы считают, что прогностическое значение метода отсутствует в раннем послеоперационном периоде, а связь с изменениями параметров КБ-МВП и функцией ЛН по шкале Хауса–Бракманна существует только в отдаленном послеоперационном периоде [45].

Критерием повреждения ЛН, по мнению ряда авторов, является изменение пороговой силы стимуляции: увеличение пороговой стимуляции на 20 мА и более коррелирует с ранним послеоперационным ухудшением функции нерва; по другим данным, увеличение пороговой силы на 30 В может прогнозировать нарушение функции ЛН в раннем послеоперационном периоде, а увеличение на 75 В – в отсроченном [23, 47].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Интраоперационный нейрофизиологический мониторинг при хирургии ВШ представляет собой важнейший компонент современного нейрохирургического подхода, способствующий снижению частоты послеоперационных неврологических осложнений и расширяющий возможности для более радикального удаления опухоли при сохранении функции черепных нервов.

Мультимодальный ИОНМ позволяет верифицировать анатомическое расположение и функциональное состояние ЛН на всех этапах хирургического вмешательства. При этом методы ИОНМ демонстрируют высокую чувствительность и специфичность в отношении прогнозирования функционального исхода, что позволяет использовать их как инструменты интраоперационной стратификации риска. Вместе с тем интерпретация данных ИОНМ требует учета множества факторов, включая анатомические особенности опухоли, анестезиологическое сопровождение и технические аспекты регистрации.

В перспективе необходимы стандартизация критериев тревоги и унификация протоколов ИОНМ при резекции ВШ. Особого внимания заслуживают направления, связанные с интеграцией данных ИОНМ с нейровизуализацией в режиме реального времени, автоматизированной интерпретацией сигналов и использованием алгоритмов машинного обучения для прогнозирования исходов. Эти подходы открывают новые возможности для повышения безопасности и эффективности хирургии ВШ.

Литература | References

- Goldbrunner R., Weller M., Regis J. et al. EANO guideline on the diagnosis and treatment of vestibular schwannoma. *Neuro Oncol* 2020;22(1):31–45. DOI: 10.1093/neuonc/noz153
- Mastrorandi L., Di Scipio E., Cacciotti G. et al. Hearing preservation after removal of small vestibular schwannomas by retrosigmoid approach: comparison of two different ABR neuromonitoring techniques. *Acta Neurochir (Wien)* 2019;161(1):69–78. DOI: 10.1007/s00701-018-3740-4
- Gupta V.K., Thakker A., Gupta K.K. Vestibular schwannoma: what we know and where we are heading. *Head Neck Pathol* 2020;14(4):1058–66. DOI: 10.1007/s12105-020-01155-x
- Thai N.L.B., Mai N.Y., Vuong N.L. et al. Treatment for vestibular schwannoma: systematic review and single arm meta-analysis. *Am J Otolaryngol* 2022;43(2):103337. DOI: 10.1016/j.amjoto.2021.103337
- McClelland S. 3rd, Guo H., Okuyemi K.S. Morbidity and mortality following acoustic neuroma excision in the United States: analysis of racial disparities during a decade in the radiosurgery era. *Neuro Oncol* 2011;13(11):1252–9. DOI: 10.1093/neuonc/nor118
- Samii M., Gerganov V.M., Samii A. Functional outcome after complete surgical removal of giant vestibular schwannomas. *J Neurosurg* 2010;112(4):860–7. DOI: 10.3171/2009.7.JNS0989
- Carlstrom L.P., Copeland W.R. 3rd, Neff B.A. et al. Incidence and risk factors of delayed facial palsy after vestibular schwannoma resection. *Neurosurgery* 2016;78(2):251–5. DOI: 10.1227/NEU.0000000000001015
- Bhimrao S.K., Le T.N., Dong C.C. et al. Role of facial nerve motor-evoked potential ratio in predicting facial nerve function in vestibular schwannoma surgery both immediate and at 1 year. *Otol Neurotol* 2016;37(8):1162–7. DOI: 10.1097/MAO.0000000000001137
- Silva J., Cerejo A., Duarte F. et al. Surgical removal of giant acoustic neuromas. *World Neurosurg* 2012;77(5–6):731–5. DOI: 10.1016/j.wneu.2011.08.019
- Troude L., Boucekine M., Montava M. et al. Predictive factors of early postoperative and long-term facial nerve function after large vestibular schwannoma surgery. *World Neurosurg* 2019;127:e599–608. DOI: 10.1016/j.wneu.2019.03.218
- Nakatomi H., Miyazaki H., Tanaka M. et al. Improved preservation of function during acoustic neuroma surgery. *J Neurosurg* 2015;122(1):24–33. DOI: 10.3171/2014.8.JNS132525
- Romstöck J., Strauss C., Fahlbusch R. Continuous electromyography monitoring of motor cranial nerves during cerebellopontine angle surgery. *J Neurosurg* 2000;93(4):586–93. DOI: 10.3171/jns.2000.93.4.0586
- Sarnthein J., Tomilov M., Baag M., Regli L. Improving intraoperative evoked potentials at short latency by a novel neuro-stimulation technology with delayed return discharge. *Clin Neurophysiol* 2021;132(6):1195–9. DOI: 10.1016/j.clinph.2021.02.396
- Baethge C., Goldbeck-Wood S., Mertens S. SANRA—a scale for the quality assessment of narrative review articles. *Res Integr Peer Rev* 2019;4:5. DOI: 10.1186/s41073-019-0064-8
- Nunes R.R., Bersot C.D.A., Garritano J.G. Intraoperative neurophysiological monitoring in neuroanesthesia. *Curr Opin Anaesthesiol* 2018;31(5):532–8. DOI: 10.1097/ACO.0000000000000645
- Liu S.W., Jiang W., Zhang H.Q. et al. Intraoperative neuromonitoring for removal of large vestibular schwannoma: facial nerve outcome and predictive factors. *Clin Neurol Neurosurg* 2015;133:83–9. DOI: 10.1016/j.clineuro.2015.03.016
- Frigeni B., Bivona R., Foresti C. et al. Predictive value of preoperative and intraoperative neurophysiology in evaluating long-term facial function outcome in acoustic neuroma surgery. *Otol Neurotol* 2020;41(4):530–6. DOI: 10.1097/MAO.0000000000002553
- Tawfik K.O., Walters Z.A., Kohlberg G.D. et al. Impact of motor-evoked potential monitoring on facial nerve outcomes after vestibular schwannoma resection. *Ann Otol Rhinol Laryngol* 2019;128(1):56–61. DOI: 10.1177/0003489418803969
- Kircher M.L., Kartush J.M. Pitfalls in intraoperative nerve monitoring during vestibular schwannoma surgery. *Neurosurg Focus* 2012;33(3):E5. DOI: 10.3171/2012.7.FOCUS12196
- Li L.P., Chen J.K., Coelho D.H. Optimizing location of subdermal recording electrodes for intraoperative facial nerve monitoring. *Laryngoscope* 2021;131(7):E2329–34. DOI: 10.1002/lary.29518
- Morota N., Ihara S., Deletis V. Intraoperative neurophysiology for surgery in and around the brainstem: role of brainstem mapping and corticobulbar tract motor-evoked potential monitoring. *Childs Nerv Syst* 2010;26(4):513–21. DOI: 10.1007/s00381-009-1080-7
- Prell J., Strauss C., Plontke S.K., Rampp S. [Intraoperative monitoring of the facial nerve: vestibular schwannoma surgery]. *HNO* 2017;65(5):404–12. (In German). DOI: 10.1007/s00106-017-0340-1
- Sarnthein J., Hejrati N., Neidert M.C. et al. Facial nerve motor evoked potentials during skull base surgery to monitor facial nerve function using the threshold-level method. *Neurosurg Focus* 2013;34(3):E7. DOI: 10.3171/2012.12.FOCUS12386
- Dong C.C., Macdonald D.B., Akagami R. et al. Intraoperative facial motor evoked potential monitoring with transcranial electrical stimulation during skull base surgery. *Clin Neurophysiol* 2005;116(3):588–96. DOI: 10.1016/j.clinph.2004.09.013
- Hardian R.F., Goto T., Kanaya K. et al. Intraoperative lumbar muscle motor evoked potential monitoring with transcortical stimulation. *World Neurosurg* 2021;146:e1126–33. DOI: 10.1016/j.wneu.2020.11.115
- Izzo A., Stifano V., Della Pepa G.M. et al. Tailored approach and multimodal intraoperative neuromonitoring in cerebellopontine angle surgery. *Brain Sci* 2022;12(9):1167. DOI: 10.3390/brainsci12091167
- Seidel K., Biner M.S., Zubak I. et al. Continuous dynamic mapping to avoid accidental injury of the facial nerve during surgery for large vestibular schwannomas. *Neurosurg Rev* 2020;43(1):241–8. DOI: 10.1007/s10143-018-1044-z
- Kartush J.M., Rice K.S., Minahan R.E. et al. Best practices in facial nerve monitoring. *Laryngoscope* 2021;131(Suppl 4):S1–42. DOI: 10.1002/lary.29459
- Sala F., Manganotti P., Tramontano V. et al. Monitoring of motor pathways during brain stem surgery: what we have achieved and what we still miss? *Neurophysiol Clin* 2007;37(6):399–406. DOI: 10.1016/j.neucli.2007.09.013
- Topsakal C., Al-Mefty O., Bulsara K.R., Williford V.S. Intraoperative monitoring of lower cranial nerves in skull base surgery: technical report and review of 123 monitored cases. *Neurosurg Rev* 2008;31(1):45–53. DOI: 10.1007/s10143-007-0105-5
- Huang X., Ren J., Xu J. et al. The utility of “low current” stimulation threshold of intraoperative electromyography monitoring in predicting facial nerve function outcome after vestibular schwannoma surgery: a prospective cohort study of 103 large tumors. *J Neurooncol* 2018;138(2):383–90. DOI: 10.1007/s11060-018-2806-8
- Cornelius J.F., Schipper J., Tortora A. et al. Continuous and dynamic facial nerve mapping during surgery of cerebellopontine angle tumors: clinical pilot series. *World Neurosurg* 2018;119:e855–63. DOI: 10.1016/j.wneu.2018.07.286
- Di Perna G., De Marco R., Baldassarre B.M. et al. Facial nerve outcome score: a new score to predict long-term facial nerve function after vestibular schwannoma surgery. *Front Oncol* 2023;13:1153662. DOI: 10.3389/fonc.2023.1153662
- Neff B.A., Ting J., Dickinson S.L., Welling D.B. Facial nerve monitoring parameters as a predictor of postoperative facial nerve

- outcomes after vestibular schwannoma resection. *Otol Neurotol* 2005;26(4):728–32. DOI: 10.1097/01.mao.0000178137.81729.35
35. Shamji M.F., Schramm D.R., Benoit B.G. Clinical predictors of facial nerve outcome after translabyrinthine resection of acoustic neuromas. *Clin Invest Med* 2007;30(6):E233–9. DOI: 10.25011/cim.v30i6.2951
36. Quimby A.E., Lui J., Chen J. Predictive ability of direct electrical stimulation on facial nerve function following vestibular schwannoma surgery: a systematic review and meta-analysis. *Otol Neurotol* 2021;42(4):493–504. DOI: 10.1097/MAO.0000000000003007
37. Deletis V., Fernandez-Conejero I., Ulkatan S., Costantino P. Methodology for intraoperatively eliciting motor evoked potentials in the vocal muscles by electrical stimulation of the corticobulbar tract. *Clin Neurophysiol* 2009;120(2):336–41. DOI: 10.1016/j.clinph.2008.11.013
38. Verst S.M., Chung T.M., Sucena A.C. et al. Comparison between the C5 or C6–Cz electrode assembly and C3 or C4–Cz assembly for transcranial electric motor activation of muscular response of the contralateral facial nerve. *Acta Neurochir (Wien)* 2012;154(12):2229–35. DOI: 10.1007/s00701-012-1505-z
39. Лаптева К.Н., Суфианов Р.А., Огурцова А.А. и др. Кортико-бульбарные моторные вызванные потенциалы в хирургии объемных образований ствола головного мозга и четвертого желудочка (обзор литературы и клиническое наблюдение). *Российский нейрохирургический журнал им. проф. А.Л. Поленова* 2022;14(4):117–21. DOI: 10.56618/20712693_2022_14_4_117
- Lapteva K.N., Sufianov R.A., Ogurtsova A.A. et al. Corticobulbar motor evoked potentials in brainstem and 4-th ventricle surgery (a case report and literature review). *Rossiyskiy neurologicheskiy zhurnal im. prof. A.L. Polenov = Russian Neurosurgical Journal named after Professor A.L. Polenov* 2022;14(4):117–21. (In Russ.). DOI: 10.56618/20712693_2022_14_4_117
40. Deletis V., Fernández-Conejero I. Intraoperative monitoring and mapping of the functional integrity of the Brainstem. *J Clin Neurol* 2016;12(3):262–73. DOI: 10.3988/jcn.2016.12.3.262
41. Fernández-Conejero I., Ulkatan S., Sen C. et al. Intraoperative monitoring of facial corticobulbar motor evoked potentials: methodological improvement and analysis of 100 patients. *Clin Neurophysiol* 2022;142:228–35. DOI: 10.1016/j.clinph.2022.08.006
42. Bovo N., Momjian S., Gondar R. et al. Sensitivity and negative predictive value of motor evoked potentials of the facial nerve. *J Neurol Surg A Cent Eur Neurosurg* 2021;82(4):317–34. DOI: 10.1055/s-0040-1719026
43. Fukuda M., Oishi M., Hiraishi T. et al. Intraoperative facial nerve motor evoked potential monitoring during skull base surgery predicts long-term facial nerve function outcomes. *Neurol Res* 2011;33(6):578–82. DOI: 10.1179/016164110X12700393823697
44. Fukuda M., Oishi M., Takao T. et al. Facial nerve motor-evoked potential monitoring during skull base surgery predicts facial nerve outcome. *J Neurol Neurosurg Psychiatry* 2008;79(9):1066–70. DOI: 10.1136/jnnp.2007.130500
45. Cosetti M.K., Xu M., Rivera A. et al. Intraoperative transcranial motor-evoked potential monitoring of the facial nerve during cerebellopontine angle tumor resection. *J Neurol Surg B Skull Base* 2012;73(5):308–15. DOI: 10.1055/s-0032-1321507
46. Calancie B., Molano M.R. Alarm criteria for motor-evoked potentials: what's wrong with the "presence-or-absence" approach? *Spine (Phila Pa 1976)* 2008;33(4):406–14. DOI: 10.1097/BRS.0b013e3181642a2f
47. Goto T., Muraoka H., Kodama K. et al. Intraoperative monitoring of motor evoked potential for the facial nerve using a cranial peg-screw electrode and a "threshold-level" stimulation method. *Skull Base* 2010;20(6):429–34. DOI: 10.1055/s-0030-1261270
48. Papatsoutsos E., Spielmann P.M. Self-evaluated quality of life and functional outcomes after microsurgery, stereotactic radiation or observation-only for vestibular schwannoma of the adult patient: a systematic review. *Otol Neurotol* 2018;39(2):232–41. DOI: 10.1097/MAO.0000000000001664
49. Prass R.L., Lüders H. Acoustic (loudspeaker) facial electromyographic monitoring: part 1. Evoked electromyographic activity during acoustic neuroma resection. *Neurosurgery* 1986;19(3):392–400. DOI: 10.1097/00006123-198609000-00010
50. Prell J., Strauss C., Rachinger J. et al. Facial nerve palsy after vestibular schwannoma surgery: dynamic risk-stratification based on continuous EMG-monitoring. *Clin Neurophysiol* 2014;125(2):415–21. DOI: 10.1016/j.clinph.2013.07.015
51. Sughrue M.E., Kaur R., Kane A.J. et al. The value of intraoperative facial nerve electromyography in predicting facial nerve function after vestibular schwannoma surgery. *J Clin Neurosci* 2010;17(7):849–52. DOI: 10.1016/j.jocn.2010.02.003
52. Prell J., Rachinger J., Scheller C. et al. A real-time monitoring system for the facial nerve. *Neurosurgery* 2010;66(6):1064–73. DOI: 10.1227/01.NEU.0000369605.79765.3E
53. Vivas E.X., Carlson M.L., Neff B.A. et al. Congress of neurological surgeons systematic review and evidence-based guidelines on intraoperative cranial nerve monitoring in vestibular schwannoma surgery. *Neurosurgery* 2018;82(2):E44–6. DOI: 10.1093/neuros/nyx513
54. Youssef A.S., Downes A.E. Intraoperative neurophysiological monitoring in vestibular schwannoma surgery: advances and clinical implications. *Neurosurg Focus* 2009;27(4):E9. DOI: 10.3171/2009.8.FOCUS09144
55. Sass H.C.R., Miyazaki H., West N. et al. Extended retrolabyrinthine approach: results of hearing preservation surgery using a new system for continuous near real-time neuromonitoring in patients with growing vestibular schwannomas. *Otol Neurotol* 2019;40(5S Suppl 1):S72–9. DOI: 10.1097/MAO.0000000000002216
56. Legatt A.D. Electrophysiology of cranial nerve testing: auditory nerve. *J Clin Neurophysiol* 2018;35(1):25–38. DOI: 10.1097/WNP.0000000000000421
57. Morota N., Deletis V. The importance of brainstem mapping in brainstem surgical anatomy before the fourth ventricle and implication for intraoperative neurophysiological mapping. *Acta Neurochir (Wien)* 2006;148(5):499–509. DOI: 10.1007/s00701-005-0672-6
58. Kombos T., Suess O., Ciklatekerlio O. et al. Monitoring of intraoperative motor evoked potentials to increase the safety of surgery in and around the motor cortex. *J Neurosurg* 2001;95(4):608–14. DOI: 10.3171/jns.2001.95.4.0608
59. Neuloh G., Bogucki J., Schramm J. Intraoperative preservation of corticospinal function in the brainstem. *J Neurol Neurosurg Psychiatry* 2009;80(4):417–22. DOI: 10.1136/jnnp.2008.157792
60. Kang D.Z., Wu Z.Y., Lan Q. et al. Combined monitoring of evoked potentials during microsurgery for lesions adjacent to the brainstem and intracranial aneurysms. *Chin Med J (Engl)* 2007;120(18):1567–73.
61. Asimakidou E., Abut P.A., Raabe A., Seidel K. Motor evoked potential warning criteria in supratentorial surgery: a scoping review. *Cancers (Basel)* 2021;13(11):2803. DOI: 10.3390/cancers13112803
62. Shibani E., Zerr M., Huber T. et al. Poor diagnostic accuracy of transcranial motor and somatosensory evoked potential monitoring during brainstem cavernoma resection. *Acta Neurochir (Wien)* 2015;157(11):1963–9. DOI: 10.1007/s00701-015-2573-7
63. MacDonald D.B. Overview on criteria for MEP monitoring. *J Clin Neurophysiol* 2017;34(1):4–11. DOI: 10.1097/WNP.0000000000000302
64. Thirumala P.D., Kodavatiganti H.S., Habeych M. et al. Value of multimodality monitoring using brainstem auditory evoked potentials and somatosensory evoked potentials in endoscopic endonasal surgery. *Neurol Res* 2013;35(6):622–30. DOI: 10.1179/1743132813Y.00000000174
65. Селиверстова Е.Г., Синкин М.В., Гринь А.А. Оценка частоты развития нейропатии лицевого нерва после микрохирургического удаления вестибулярной шванномы с использованием

метода прямой электрической стимуляции. *Анналы клинической и экспериментальной неврологии* 2025;19(2):52–61. DOI: 10.17816/ACEN.1234
Seliverstova E.G., Sinkin M.V., Grin A.A. Incidence of facial palsy following microsurgical removal of vestibular schwannoma using direct electrical stimulation: a meta-analysis. *Annaly klinicheskoy i eksperimentalnoy nevrologii = Annals of Clinical and Experimental Neurology* 2025;19(2):52–61. (In Russ.). DOI: 10.17816/ACEN.1234

66. Della Pepa G.M., Stifano V., D'Alessandris Q.G. et al. Intraoperative corticobulbar motor evoked potential in cerebellopontine angle surgery: a clinically meaningful tool to predict early and late facial nerve recovery. *Neurosurgery* 2022;91(3):406–13. DOI: 10.1227/neu.0000000000002039
67. Hendriks T., Kunst H.P.M., Huppelschoten M. et al. TeMEP threshold change is superior to a-train detection when predicting facial nerve outcome in CPA tumour surgery. *Acta Neurochir (Wien)* 2020;162(5):1197–203. DOI: 10.1007/s00701-020-04275-z

Вклад авторов

Т.В. Козлова: разработка концепции и дизайна исследования, анализ данных литературы, сбор и анализ данных, написание текста статьи;
А.А. Зувев: разработка концепции и дизайна исследования, научное редактирование.

Authors' contributions

T.V. Kozlova: study concept and design, analysis of literature data, data collection and analysis, article writing;
A.A. Zuev: study concept and design, scientific editing.

ORCID авторов / ORCID of authors

А.А. Зувев / A.A. Zuev: <https://orcid.org/0000-0003-2974-1462>
Т.В. Козлова / T.V. Kozlova: <https://orcid.org/0009-0000-9751-7329>

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Финансирование. Работа выполнена без спонсорской поддержки.

Funding. The work was performed without external funding.