

ИНТРАОПЕРАЦИОННЫЙ НЕЙРОФИЗИОЛОГИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ В ХИРУРГИИ ОПУХОЛЕЙ ГОЛОВНОГО МОЗГА СУПРАТЕНТОРИАЛЬНОЙ ЛОКАЛИЗАЦИИ. ЧАСТЬ 1. ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИГАТЕЛЬНОЙ ПРОВОДИМОСТИ

А.Ю. Дмитриев^{1,2}, М.В. Синкин^{1,2}, В.Г. Дашьян^{1,2}

¹ГБУЗ «Научно-исследовательский институт скорой помощи им. Н.В. Склифосовского Департамента здравоохранения г. Москвы»; Россия, 129090 Москва, Большая Сухаревская пл., 3;

²ФГБОУ ВО «Московский государственный медико-стоматологический университет им. А.И. Евдокимова» Минздрава России; Россия, 127473 Москва, ул. Делегатская, 20, стр. 1

Контакты: Александр Юрьевич Дмитриев dmitriev@neurosklif.ru

Мониторинг моторных вызванных потенциалов в хирургии супратенториальных опухолей оценивает целостность корковых двигательных центров и подкорковых проводящих путей. При механическом повреждении и ишемии двигательных нейронов происходит нарушение моторных вызванных потенциалов, при этом снижение их амплитуды более чем на 50 % служит предиктором стойких неврологических нарушений.

Картирование коры головного мозга дает возможность обнаружить функционально значимые центры до их резекции. Для выявления двигательных центров оценивают эффект активирующего влияния электростимуляции, для выявления центров речи и чувствительности – угнетающего. Позитивное картирование позволяет исключить техническую ошибку при подборе порога электростимуляции, но требует широкой краниотомии. Негативное картирование более распространено, позволяет обойтись небольшой трепанацией черепа, что снижает травматичность операции и ее продолжительность.

Один из главных факторов при картировании мозга – выбор порога электростимуляции. При монополярной стимуляции «пачками» импульсов ток силой 1 мА распространяется на глубину около 1 мм. При резекции опухолей функционально значимых зон безопасным считают ее прекращение при значениях силы тока 3–5 мА.

При картировании коры монополярная стимуляция по точности сопоставима с биполярной, но требует меньше времени для локализации функционально значимых центров мозга и реже приводит к возникновению интраоперационных судорог. Комбинация монополярного электростимулятора и аспиратора дает возможность непрерывно локализовать пирамидный тракт при резекции опухоли.

Ключевые слова: интраоперационный нейрофизиологический мониторинг, ИОНМ, моторные вызванные потенциалы, МВП, картирование мозга, опухоль функционально значимой зоны

Для цитирования: Дмитриев А.Ю., Синкин М.В., Дашьян В.Г. Интраоперационный нейрофизиологический мониторинг в хирургии опухолей головного мозга супратенториальной локализации. Часть 1. Исследование двигательной проводимости. Нейрохирургия 2022;24(2):105–112. DOI: 10.17650/1683-3295-2022-24-2-105-112.

Intraoperative neuromonitoring in surgery of supratentorial brain tumors. Part 1. Assessment of motor conductivity

A. Yu. Dmitriev^{1,2}, M. V. Sinkin^{1,2}, V. G. Dashyan^{1,2}

¹N. V. Sklifosovsky Research Institute for Emergency Medicine, Moscow Healthcare Department; 3 Bolshaya Sukharevskaya Sq., Moscow 129090, Russia;

²A. I. Evdokimov Moscow State University of Medicine and Dentistry, Ministry of Health of Russia; Bld. 1, 20 Delegatskaya St., Moscow 127473, Russia

Contacts: Aleksandr Yurevich Dmitriev dmitriev@neurosklif.ru

Monitoring of motor evoked potentials in surgery of supratentorial tumors estimates integrity of cortical motor centers and subcortical pathways. Violation of motor evoked potentials takes place in mechanical injury or ischemia of motor neurons. Decrease of amplitude of motor evoked potentials more than 50 % is predictor of permanent neurological deficit.

Cortical mapping gives a possibility to discover eloquent brain areas before their resection. To reveal motor centers activating stimulation is applied, to find out speech or sensory areas – the inhibiting one. Positive brain mapping allows to exclude technical fault in selection of stimulation threshold but it demands a wide craniotomy. Negative mapping is more widespread, gives opportunity to use tailored craniotomy that reduces surgical injury and duration of operation. One of the most valuable factors in cortical and subcortical brain mapping is the stimulation threshold. With monopolar “train” stimulation current 1 mA spreads into approximately 1 mm. The safe value of current intensity during tumor resection in eloquent areas is 3–5 mA.

Monopolar stimulation demands less time for location of eloquent brain areas, it is as accurate as the bipolar mapping and more rarely leads to intraoperative seizures. Combination of monopolar stimulator with aspirator gives opportunity to continuously allocate pyramidal tract in tumor resection.

Key words: intraoperative neuromonitoring, IONM, motor evoked potentials, MEP, brain mapping, tumor of eloquent brain area

For citation: Dmitriev A.Yu., Sinkin M.V., Dashyan V.G. Intraoperative neuromonitoring in surgery of supratentorial brain tumors. Part 1. Assessment of motor conductivity. *Neyrokhirurgiya = Russian Journal of Neurosurgery* 2022;24(2):105–12. (In Russ.). DOI: 10.17650/1683-3295-2022-24-2-105-112.

ВВЕДЕНИЕ

Расположение функционально значимых центров головного мозга и подкорковых проводящих путей определяют на этапе подготовки к хирургическому вмешательству с помощью функциональной магнитно-резонансной томографии (МРТ), транскраниальной магнитной стимуляции, позитронно-эмиссионной томографии и трактографии. Эти методы получили широкое распространение с внедрением нейронавигации. Совмещение анатомических изображений с функциональными носит название функциональной навигации [1]. Ее роль неопределима в предоперационном планировании и выполнении хирургического доступа. Метод расширил показания к операции при некоторых опухолях и артериовенозных мальформациях [2–5].

Главное препятствие для качественной функциональной нейронавигации – интраоперационное смещение мозга, достигающее нескольких сантиметров при больших новообразованиях [6]. Это делает неактуальными данные о локализации функционально значимых зон (ФЗЗ) головного мозга. Из-за нелинейного характера сдвига мозга только интраоперационная МРТ способна отобразить новое точное расположение этих центров [7]. Но даже на эти данные нельзя полностью полагаться, так как между сканированием и возобновлением операции возможна дальнейшая церебральная дислокация [8].

Интраоперационное нейрофизиологическое картирование считают «золотым стандартом» локализации ФЗЗ головного мозга, к тому же это единственный способ оценки их расположения в реальном времени [9]. За 80 лет метод претерпел значительные усовершенствования, теперь он позволяет определять расположение двигательных, чувствительных, зрительных центров головного мозга и контролировать их целост-

ность во время операции даже во время наркоза. Однако локализация зон речи, когнитивных функций, внимания, памяти и калькуляции чисел по-прежнему требует пробуждения пациента [10].

Методы интраоперационного нейрофизиологического мониторинга можно классифицировать двумя способами. При первом – анатомическом, способе критерием разделения служит направление, в котором распространяется стимулирующий импульс. В этом случае выделяют методики для исследования чувствительного и двигательного проведения. При оценке сенсорной функции раздражают периферический отдел соответствующего анализатора, а ответ регистрируют с коры мозга. При исследовании двигательного проведения стимулируют кору мозга или подкорковые проводящие пути и с помощью электронейромиографии регистрируют такие спровоцированные мышечные сокращения, которые называют моторными вызванными потенциалами (МВП).

Второй – функциональный, способ: интраоперационные нейрофизиологические исследования делят на методы локализации (картирования) функционально значимых центров мозга или подкорковых трактов и методы мониторинга их функций. Двигательную проводимость оценивают для обнаружения и проверки целостности двигательных центров и проводящих путей. Выделяют мониторинг с помощью МВП и картирование двигательной коры, кортико-спинального и кортико-бульбарного трактов.

МОНИТОРИНГ КОРТИКАЛЬНЫХ МОТОРНЫХ ВЫЗВАННЫХ ПОТЕНЦИАЛОВ

Для такого мониторинга проводят транскраниальную или корковую стимуляцию. В первом случае используют скальповые электроды (фиксируют на мягких тканях головы), во втором – кортикальные

(устанавливают на поверхность головного мозга субдурально) [11].

Снижение амплитуды МВП служит прогностическим фактором послеоперационных двигательных нарушений. Необратимое уменьшение МВП чаще приводит к стойкому неврологическому дефициту, тогда как обратимые нарушения — к временным расстройствам. Полное исчезновение МВП прогностически хуже их снижения. Стойкое исчезновение ответов обычно происходит при повреждении пирамидного пути на подкорковом уровне, а снижение — при поражении коры первичного двигательного центра. Падение амплитуды МВП позволяет хирургу вовремя остановить резекцию и предотвратить более тяжелый послеоперационный дефицит [12–15].

Снижение амплитуды ответа в диапазоне от 25 до 50 % от исходного должно насторожить хирурга, но не может служить поводом для прекращения резекции опухоли, так как существует вероятность ложноположительных результатов, вызванных давлением на стимулирующие электроды, их ирригацией и смещением [16].

Принцип падения амплитуды МВП «все или ничего», практикуемый в спинальной нейрохирургии, нельзя применить при краниальных операциях. Нарастание двигательных нарушений после хирургических вмешательств чаще происходит при снижении амплитуды более чем на 50 %. У большинства больных такие дисфункции транзиторные [11].

О повреждении пирамидного пути также свидетельствует внезапное и не объяснимое другими причинами увеличение латентности МВП более 10 % [13].

Сохранность амплитуд МВП на протяжении всей операции точно прогнозирует отсутствие послеоперационных двигательных нарушений. Редкие моторные дисфункции (транзиторные — 9 %, постоянные — 4 %) могут быть обусловлены отеком, кровоизлияниями, неполным мониторингом всех мышц и синдромом дополнительной двигательной зоны (синдром SMA, supplemental motor area). Отсутствие изменений при МВП во время удаления опухолей ФЗЗ вселяет в хирурга уверенность в сохранности двигательных центров, что повышает радикальность операции [13, 16]. При этом МВП могут не зарегистрировать развитие ишемии при повреждении сосудов, так как на микроуровне происходит отсроченное снижение перфузии [16].

При удалении метастазов около моторной зоны прогностически значимым критерием послеоперационного дефицита служит необратимое падение амплитуды МВП более чем на 80 %. Обратимое снижение величины ответов более чем на 80 % обычно не приводит к стойким послеоперационным нарушениям. Неврологический исход у таких больных также зависит от локализации метастаза, но не от типа опухоли. Другие факторы риска — наличие предопераци-

онного пареза и предшествующая операции лучевая терапия [17].

При слишком высокой силе тока транскраниальные МВП могут активировать подкорковые проводящие пути, минуя кору, приводя к ложноотрицательным результатам (повреждение коры мозга остается нераспознанным). Для предотвращения этого устанавливают субдуральный стимулирующий электрод на двигательную зону, хотя он может мешать хирургическим манипуляциям. В таком случае мониторинг моторной коры заменяют периодическим кортикальным картированием отдельным стимулирующим зондом с шагом 2 мм [18].

Значимое снижение МВП может происходить не только из-за прямого хирургического воздействия на корковые центры и подкорковые проводящие пути, но и вследствие повреждения сосудов (особенно центральных перфорантов) с формированием очагов ишемии. У 70 % пациентов отграниченные инфаркты мозга в моторной зоне служат причиной стойких послеоперационных двигательных нарушений с падением МВП более чем на 50 %. Чаще такие изменения возникают при ревизионных операциях после перенесенной лучевой терапии. Поэтому при снижении амплитуды МВП более чем на 50 % нужно принять меры по нормализации перфузии мозга, включающие остановку резекции, удаление шпателей, ирригацию мозга теплым раствором Рингера и нимодипином, повышение артериального давления. Корковые МВП, полученные при помощи субдурального электрода, позволяют обнаружить такие ишемические нарушения лишь в 71 % случаев. Видимо, у оставшихся 29 % пациентов очаги ишемии формируются позднее, после окончания мониторинга. Применение транскраниальных МВП после удаления кортикальных электродов позволяет вести нейромониторинг и во время закрытия операционной раны [19].

Снижение амплитуды МВП свидетельствует о механическом или ишемическом повреждении подкорковых трактов, однако возможны и ложноположительные результаты. Это происходит при смещении стимулирующего субдурального электрода, западении мозга и образовании воздушной прослойки между черепом и мозгом. Одновременное снижение транскраниальных МВП должно всегда насторожить хирурга и послужить поводом для выполнения прямой электростимуляции зондом [20–22].

Ограничение мониторинга МВП методами электростимуляции коры заключается в том, что при полном исчезновении моторного ответа возможность восстановления целостности кортико-спинального тракта уже отсутствует. Это отличает мониторинг двигательных путей от картирования, при котором перед резекцией проводят электростимуляцию моторной ФЗЗ, что позволяет предотвратить ее непреднамеренное повреждение [11].

КАРТИРОВАНИЕ КОРЫ ГОЛОВНОГО МОЗГА

Картирование коры проводят однократно при выборе места энцефалотомии. По клиническим проявлениям ее влияние в ответ на электрическую стимуляцию может быть активирующим и угнетающим.

Для локализации моторной зоны применяют низкочастотную стимуляцию, приводящую к сокращению мышц, соответствующих соматотопическому расположению их представительства в контралатеральной прецентральной извилине. Это активирующее влияние стимуляции, и ее можно проводить во время наркоза при отсутствии мышечных релаксантов [23, 24].

Для определения центров речи и чувствительности больной должен быть в сознании, понимать и выполнять задания. В процессе картирования пациент называет изображения на поочередно показываемых картинках, а в это время хирург прикладывает стимулятор к разным участкам коры. Это угнетающее проявление стимуляции, которое приводит к нарушению нормальной проводимости сигнала по нейронной сети. Те зоны, при воздействии на которые возникают речевые или чувствительные нарушения, участвуют в синтезе речи и являются ФЗЗ [23, 24].

По методологии проведения выделяют позитивное и негативное картирование. При позитивном выполняют широкую краниотомию, обязательно выявляют ФЗЗ, после чего проводят энцефалотомию для удаления опухоли. При таком подходе можно быть уверенным в правильно подобранном пороге электростимуляции и отсутствии технической ошибки. При негативном картировании размер трепанации ограничен, превышая размеры опухоли лишь на 3 см. Нейростимуляцию проводят только в зоне предполагаемой резекции мозга и не ставят задачу обязательного обнаружения его функциональных центров. Энцефалотомию выполняют при отсутствии электрографических и клинических признаков значимых зон. Такой подход более распространен, поскольку его применение позволяет снизить травматичность операции, достичь высокой радикальности хирургического вмешательства с хорошими функциональными исходами, не уступающими результатам позитивного картирования [25].

Зону стимуляции считают ФЗЗ при регистрации двух воспроизводимых ответов при ее повторной стимуляции. Однако не следует раздражать кору более двух раз подряд во избежание судорог [26]. При хирургии с наркозом у пациентов с судорогами в анамнезе требуется бо́льшая сила тока для получения моторного ответа, чем без наркоза (24 и 18,5 мА соответственно) [27].

Определение порога стимуляции — один из основных факторов, обеспечивающий безопасность резекции опухоли и радикальность операции. Снижение силы тока приводит к уменьшению расстояния, при котором могут быть выявлены функциональные цен-

тры, что увеличивает радикальность резекции, но ухудшает функциональные исходы. По данным S.S. Prabhu и соавт. (2011), при резекции опухолей, расположенных в непосредственной близости к двигательной коре, безопасным считается порог электростимуляции 5 мА [28], а по мнению K. Seidel и соавт. (2012), — 3 мА [18]. Согласно работе Н. Duffau (2012), при удалении диффузных глиом прекращать резекцию необходимо лишь в случае прямого контакта с функционально значимой корой, и нет необходимости оставлять 5–10 мм ткани мозга вокруг нее. Неврологические нарушения при такой тактике почти всегда преходящие, а частота постоянных — не превышает 2 % [29].

Регистрация коркового зонда-стимулятора в навигационной системе облегчает ориентацию в ране, ускоряет обнаружение ФЗЗ и позволяет фиксировать их координаты в навигационной системе. Но точность совмещения снижается при нарастании сдвига мозга [28, 30]. Дополнительно необходимо обращать внимание на регистрационную ошибку и невозможность оценить глубину борозды при кортикальной стимуляции [31].

Основное преимущество электростимуляции коры головного мозга — высокая точность и специфичность данного метода, фактически делающие его «золотым стандартом» для выявления функционально значимых корковых центров. Недостаток — сложность стимуляции глубинных частей извилин, а они составляют 2/3 от всей поверхности коры головного мозга [23].

Изолированная стимуляция коры мозга в процессе резекции глиом ФЗЗ, проведенная без последующего исследования проводящих путей, в 43 % случаев сопровождается нарастанием очаговых симптомов после операции, при этом 21 % из них — стойкие [32].

МОНИТОРИНГ И КАРТИРОВАНИЕ ПОДКОРКОВЫХ ПРОВОДЯЩИХ ПУТЕЙ

Повреждение подкорковых трактов — основная причина появления очаговых неврологических нарушений после операции. Об этом одним из первых указали М.А. Naeser и соавт. (1989) [33].

Повреждение подкорковых трактов — причина ухудшения состояния в 90 % случаев. Такие нарушения чаще более стойкие [26].

На точность обнаружения проводящих путей влияют параметры стимуляции, поскольку затухание электрического тока в ткани мозга происходит нелинейно и зависит от типа нейростимуляции и длительности импульсов. Наиболее эффективна катодная монополярная стимуляция «пачками» из 4–5 импульсов с общей длительностью 0,5–0,7 мс. Это связано с лучшим проникновением катодного тока сквозь ткани. Кроме этого, именно такие параметры картирования позволяют максимально близко приблизиться к линейной зависимости между силой тока

и расстоянием до проводящих путей, что соответствует «золотому правилу» нейрофизиологии: 1 мА = 1 мм [34].

Это предположение первыми подтвердили S. Ohue и соавт. (2012), сравнивая результаты подкорковой стимуляции с послеоперационной трактографией [35]. Авторы определяли силу тока, при которой происходила активация пирамидного тракта, после чего останавливали резекцию, а при контрольной МРТ измеряли расстояние между кортикоспинальным трактом и краем полости удаленной опухоли. Сила тока 5 мА соответствовала расстоянию 5,0, 10 мА — 10,2, 15 мА — 15,3, 20 мА — 20,5 мм. Таким образом, вероятность обнаружения пирамидного пути и расстояние до него зависят от силы стимулирующего тока [35].

При резекции опухолей, расположенных вблизи пирамидного тракта, при монополярной стимуляции «пачками» импульсов минимальная сила тока 5 мА, соответствующая расстоянию 5 мм, служит пограничной для прекращения операции без нарастания неврологического дефицита. Этот показатель одинаков для операций как с пробуждением, так и с наркозом [28, 36].

По данным G. Plans и соавт. (2017), фактор риска появления стойких неврологических нарушений при картировании пирамидного тракта — получение МВП при стимуляции минимальной силой тока 3 мА [37]. Частота неврологических осложнений при этом варьирует от 85 до 100 %. В таких случаях необходимо немедленно остановить хирургические манипуляции в этой зоне. Особенно важно соблюдать это требование при расположении опухоли в местах с низкой плотностью проводящих путей из-за возможности возникновения селективного пареза в немониторируемых мышцах. Преоперационный парез увеличивает частоту нарастания неврологических осложнений у таких больных в 2,3 раза, а стойких дисфункций — в 7,3 раза [36, 37]. Характеристика подкорковой стимуляции с силой тока 3 мА: чувствительность в обнаружении кортикоспинального пути — 83 %, специфичность — 95 %, положительная прогностическая значимость — 71 %, а отрицательная — 97 % [36].

Другого мнения придерживаются K. Seidel и соавт. (2013) [38]. Прооперировав 100 больных с глиомами и метастазами (в пределах 1 см от пирамидного тракта), авторы описали возможность применения порога стимуляции при подкорковом картировании всего в 1–3 мА с развитием стойких двигательных нарушений лишь у 8 % пациентов. Но такую стимуляцию необходимо проводить совместно с мониторингом корковых МВП, сохранение которых свидетельствует о сохранности кортико-спинального пути на всем протяжении. Это особенно важно для исключения его ишемии вследствие повреждения лентикулостриарных артерий. Кроме того, при такой малой дистанции до пирамидного тракта необходима тщательная стимуляция с интервалом в 1 мм, что увеличивает



Интеграция монополярного зонда и аспиратора. Используется для непрерывного картирования корковых центров и подкорковых проводящих путей в процессе резекции опухоли

Integration of monopolar coagulator and aspirator. It used for continuous mapping of cortical areas and subcortical tracts during tumor resection

продолжительность операции и часто технически затруднено из-за ограниченного пространства. Учитывая возможные различия импеданса тканей мозга вокруг опухоли, авторы не советуют использовать порог субкортикальной стимуляции менее 2 мА [38].

Модификация нейрохирургического аспиратора — его интеграция с монополярным зондом (см. рисунок), в результате которой на его изолированный кончик подается электрический стимул, приводит к тому, что аспиратор становится монополярным стимулятором. Такая трансформация позволяет совмещать мониторинг глубины расположения кортико-спинального тракта с одновременным удалением опухоли, что значительно облегчает и ускоряет основной этап операции [39].

Таким же образом можно модифицировать ультразвуковой дезинтегратор. Активация устройства приводит к незначительному увеличению силы тока (на 5–7 %), что не нарушает методологию субкортикального мониторинга [40].

СРАВНЕНИЕ БИПОЛЯРНОЙ И МОНОПОЛЯРНОЙ ЭЛЕКТРОСТИМУЛЯЦИИ

Картирование коры головного мозга можно выполнять би- или монополярным стимулирующим электродом. При использовании биполярного электростимулятора обычно применяют ток с частотой 50 Гц, силой 1–20 мА, длительностью одного стимула — 1 мс, максимальным временем стимуляции — 10 с, при этом расстояние между браншами электрода — 5 мм. При монополярной стимуляции используют ток с частотой 500 Гц, силой 1–20 мА и продолжительностью всего 50 мс. Сила тока зависит от вида анестезии. При операциях с наркозом применяют ток 6–18 мА, при операциях, когда пациент в сознании, — 2–6 мА. Биполярная стимуляция более локальная, но чаще вызывает судороги. При монополярной стимуляции можно

лоцировать проводящие пути на большем расстоянии, но это требует и большей силы тока. Из-за ограниченных размеров области исследования биполярная стимуляция требует большего времени для локализации функциональной зоны [18, 41, 42].

Биполярная подкорковая стимуляция может быть менее точной, чем монополярная. Причина в неомогенности тока за пределами браншей биполярного электрода. Ток при монополярной стимуляции распространяется одинаково во все стороны, входя в нейрон перпендикулярно аксону, что делает стимуляцию более эффективной [38].

Высокочастотная монополярная стимуляция, несмотря на большую силу тока, за счет более короткой продолжительности стимулов реже приводит к развитию интраоперационных судорог. Поэтому ее применение целесообразно при наличии в анамнезе эпилептических приступов, особенно при операциях в сознании [43].

По данным А.В. Косырьковой и соавт. (2020), результаты моно- и биполярной подкорковой стимуляции не различаются по пороговой силе тока, частоте положительных моторных ответов и количеству вовлекаемых в ответ мышечных групп. Число двигательных ответов зависит от силы тока при обоих методах [44].

Дополнительное преимущество высокочастотной монополярной стимуляции: с ее помощью возможно получить моторные ответы при более глубокой степени медикаментозной седации [45].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мониторинг моторных вызванных потенциалов позволяет оценить сохранность моторной коры и про-

водящих путей. Падение амплитуды моторных вызванных потенциалов более чем на 50 % служит фактором риска появления очаговых неврологических нарушений после операции и предиктором стойких неврологических нарушений. Раннее обнаружение снижения моторных вызванных потенциалов с немедленной остановкой хирургических манипуляций в этой зоне, ирригацией мозга теплым солевым раствором и повышением артериального давления дают возможность в ряде случаев предотвратить появление неврологического дефицита.

Корковое и подкорковое картирование позволяют обнаружить двигательный центр и пирамидный путь до начала их резекции, что дает возможность предотвратить деструкцию функционально значимых участков мозга. Поскольку субкортикальная стимуляция не способна определить повреждение коры, ее комбинируют с корковой электростимуляцией.

Корковое и подкорковое картирование повышают уверенность хирурга при манипуляциях возле моторной коры и пирамидного пути. Определение безопасного расстояния до них в 3–5 мм с помощью постоянной монополярной стимуляции повышает радикальность резекции при незначительном риске стойких двигательных нарушений после операции.

Из-за распространения тока во все стороны от зонда монополярная стимуляция происходит быстрее биполярной, не уступает ей в точности, а вследствие большей частоты тока реже приводит к возникновению интраоперационных судорог. Интеграция монополярного электростимулятора в хирургический аспиратор позволяет выполнять непрерывную локацию пирамидного пути в процессе резекции опухоли.

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Nimsky C., Kuhnt D., Ganslandt O., Buchfelder M. Multimodal navigation integrated with imaging. *Acta Neurochir Suppl* 2011;109:207–14. DOI: 10.1007/978-3-211-99651-5_32.
2. Krishnan R., Raabe A., Hattingen E. et al. Functional magnetic resonance imaging-integrated neuronavigation: correlation between lesion-to-motor cortex distance and outcome. *Neurosurgery* 2004;55(4):904–15. DOI: 10.1227/01.neu.0000137331.35014.5c.
3. Cannestra A.F., Pouratian N., Forage J. et al. Functional magnetic resonance imaging and optical imaging for dominant-hemisphere perisylvian arteriovenous malformations. *Neurosurgery* 2004;55(4):804–14. DOI: 10.1227/01.neu.0000137654.27826.71.
4. Duffau H., Lopes M., Arthuis F. et al. Contribution of intraoperative electrical stimulations in surgery of low grade gliomas: a comparative study between two series without (1985–1996) and with (1996–2003) functional mapping in the same institution. *J Neurol Neurosurg Psychiatry* 2005;76(6):845–51. DOI: 10.1136/jnnp.2004.048520.
5. Southwell D.G., Birk H.S., Han S.J. et al. Resection of gliomas deemed inoperable by neurosurgeons based on preoperative imaging studies. *J Neurosurg* 2018;129(3):567–75. DOI: 10.3171/2017.5.JNS17166.
6. Nimsky C., Ganslandt O., Cerny S. et al. Quantification of, visualization of, and compensation for brain shift using intraoperative magnetic resonance imaging. *Neurosurgery* 2000;47(5):1070–9. DOI: 10.1097/00006123-200011000-00008.
7. Seifert V., Gasser T., Senft C. Low field intraoperative MRI in glioma surgery. *Acta Neurochir Suppl* 2011;109:35–41. DOI: 10.1007/978-3-211-99651-5_6.
8. Bohinski R.J., Kokkino A.K., Warnick R.E. et al. Glioma resection in a shared-resource magnetic resonance operating room after optimal image-guided frameless stereotactic resection. *Neurosurgery* 2001;48(4):731–42. DOI: 10.1097/00006123-200104000-00007.
9. Ostry S., Belsan T., Otahal J. et al. Is intraoperative diffusion tensor imaging at 3.0T comparable to subcortical corticospinal tract mapping? *Neurosurgery* 2013;73(5):797–807. DOI: 10.1227/NEU.0000000000000087.
10. Duffau H. Awake surgery for nonlanguage mapping. *Neurosurgery* 2010;66(3):523–8. DOI: 10.1227/01.NEU.0000364996.97762.73.

11. Zhou H.H., Kelly P.J. Transcranial electrical motor evoked potential monitoring for brain tumor resection. *Neurosurgery* 2001;48(5):1075–80. DOI: 10.1097/00006123-200105000-00021.
12. Szelenyi A., Hattingen E., Weidauer S. et al. Intraoperative motor evoked potential alteration in intracranial tumor surgery and its relation to signal alteration in postoperative magnetic resonance imaging. *Neurosurgery* 2010;67(2):302–13. DOI: 10.1227/01.NEU.0000371973.46234.46.
13. Neuloh G., Pechstein U., Cedzich C., Schramm J. Motor evoked potential monitoring with supratentorial surgery. *Neurosurgery* 2004;54(5):1061–70. DOI: 10.1227/01.neu.0000119326.15032.00.
14. Szelenyi A., Langer D., Kothbauer K. et al. Monitoring of muscle motor evoked potentials during cerebral aneurysm surgery: intraoperative changes and postoperative outcome. *J Neurosurg* 2006;105(5):675–81. DOI: 10.3171/jns.2006.105.5.675.
15. Neuloh G., Pechstein U., Schramm J. Motor tract monitoring during insular glioma surgery. *J Neurosurg* 2007;106(4):582–92. DOI: 10.3171/jns.2007.106.4.582.
16. Krieg S.M., Shibani E., Droese D. et al. Predictive value and safety of intraoperative neurophysiological monitoring with motor evoked potentials in glioma surgery. *Neurosurgery* 2012;70(5):1060–70. DOI: 10.1227/NEU.0b013e31823f5ade.
17. Krieg S.M., Schaffner M., Shibani E. et al. Reliability of intraoperative neurophysiological monitoring using motor evoked potentials during resection of metastases in motor-eloquent brain regions: clinical article. *J Neurosurg* 2013;118(6):1269–78. DOI: 10.3171/2013.2.JNS121752.
18. Seidel K., Beck J., Stieglitz L. et al. Low-threshold monopolar motor mapping for resection of primary motor cortex tumors. *Operative Neurosurgery* 2012;71(1 Suppl Operative):104–14. DOI: 10.1227/NEU.0b013e31824c02a0.
19. Gempt J., Krieg S.M., Hutterling S. et al. Postoperative ischemic changes after glioma resection identified by diffusion-weighted magnetic resonance imaging and their association with intraoperative motor evoked potentials. *J Neurosurg* 2013;119(4):829–36. DOI: 10.3171/2013.5.JNS121981.
20. Жуков В.Ю., Горайнов С.А., Огурцова А.А. и др. Диффузионно-тензорная трактография и интраоперационный нейрофизиологический мониторинг в хирургии внутримозговых опухолей. Журнал «Вопросы нейрохирургии» им. Н.Н. Бурденко 2016;80(1):5–18. [Zhukov V.Yu., Goryaynov S.A., Ogurtsova A.A. et al. Diffusion tensor imaging tractography and intraoperative neurophysiological monitoring in surgery of intracranial tumors located near the pyramidal tract. *Zhurnal Voprosy Neurokhirurgii im. N.N. Burdenko = Burdenko's Journal of Neurosurgery* 2016;80(1):5–18. (In Russ., In Eng.).] DOI: 10.17116/neiro20168015-18.
21. Зуев А.А., Коротченко Е.Н., Иванова Д.С. и др. Хирургическое лечение опухолей функционально значимых зон головного мозга с применением метода нейрофизиологического картирования речевых, моторных зон и проводящих путей. Журнал «Вопросы нейрохирургии» им. Н.Н. Бурденко 2017;81(1):39–50. [Zuev A.A., Korotchenko E.N., Ivanova D.S. et al. Surgical treatment of eloquent brain area tumors using neurophysiological mapping of the speech and motor areas and conduction tracts. *Zhurnal Voprosy Neurokhirurgii im. N.N. Burdenko = Burdenko's Journal of Neurosurgery* 2017;81(1):39–50. (In Russ.).] DOI: 10.17116/neiro201780739-50.
22. Suess O., Kombos T., Suess S. et al. The influence of intra-operative brain shift on continuous cortical stimulation during surgery in the motor cortex – an illustrative case report. *Acta Neurochir (Wien)* 2001;143(6):621–3. DOI: 10.1007/s007010070068.
23. Tharin S., Golby A. Functional brain mapping and its applications to neurosurgery. *Neurosurgery* 2007;60(4 Suppl 2):185–201. DOI: 10.1227/01.NEU.0000255386.95464.52.
24. Кобяков Г.Л., Лубнин А.Ю., Куликов А.С. и др. Краниотомия в сознании. Журнал «Вопросы нейрохирургии» им. Н.Н. Бурденко 2016;80(1):107–16. [Kobyakov G.L., Lubnin A.Yu., Kulikov A.S. et al. Awake craniotomy. *Zhurnal Voprosy Neurokhirurgii im. N.N. Burdenko = Burdenko's Journal of Neurosurgery* 2016;80(1):107–16. (In Russ., In Eng.).] DOI: 10.17116/neiro2016801107-116.
25. Sanai N., Mirzadeh Z., Berger M.S. Functional outcome after language mapping for glioma resection. *N Engl J Med* 2008;358(1):18–27. DOI: 10.1056/NEJMoa067819.
26. Trinh V.T., Fahim D.K., Shah K. et al. Subcortical injury is an independent predictor of worsening neurological deficits following awake craniotomy procedures. *Neurosurgery* 2013;72(2):160–9. DOI: 10.1227/NEU.0b013e31827b9a11.
27. Улитин А.Ю., Костенко И.А., Александров М.В. и др. Картирование моторной коры при симптоматической эпилепсии у пациентов с первичными глиальными опухолями. Российский нейрохирургический журнал им. проф. А.Л. Поленова 2017;9(2):50–4. [Ulitin A.Yu., Kostenko I.A., Alexandrov M.V. et al. Motor cortex mapping and symptomatic epilepsy in patients with primary glial tumors. *Russian neurosurgical journal named after professor A.A. Polenov* 2017;9(2):50–4. (In Russ.).] DOI: 10.1007/s00701-011-1216-x.
28. Prabhu S.S., Gasco J., Tummala S. et al. Intraoperative magnetic resonance imaging-guided tractography with integrated monopolar subcortical functional mapping for resection of brain tumors. *Clinical article. J Neurosurg* 2011;114(3):719–26. DOI: 10.3171/2010.9.JNS10481.
29. Duffau H. Awake surgery for incidental WHO grade II gliomas involving eloquent areas. *Acta Neurochir (Wien)* 2012;154(4):575–84. DOI: 10.1007/s00701-011-1216-x.
30. Suess O., Kombos T., Hoell T. et al. A new cortical electrode for neuronavigation-guided intraoperative neurophysiological monitoring: technical note. *Acta Neurochir (Wien)* 2000;142(3):329–32. DOI: 10.1007/s007010050042.
31. Krings T., Schreckenberger M., Rohde V. et al. Functional MRI and ¹⁸F FDG-positron emission tomography for presurgical planning: comparison with electrical cortical stimulation. *Acta Neurochir (Wien)* 2002;144(9):889–99. DOI: 10.1007/s00701-002-0992-8.
32. Kim S.S., McCutcheon I.E., Suki D. et al. Awake craniotomy for brain tumors near eloquent cortex: correlation of intraoperative cortical mapping with neurological outcomes in 309 consecutive patients. *Neurosurgery* 2009;64(5):836–45. DOI: 10.1227/01.NEU.0000342405.80881.81.
33. Naeser M.A., Palumbo C.L., Helm-Estabrooks N. et al. Severe nonfluency in aphasia: role of the medial subcallosal fasciculus and other white matter pathways in recovery of spontaneous speech. *Brain* 1989;112(1):1–38. DOI: 10.1093/brain/112.1.1.
34. Shibani E., Krieg S.M., Haller B. et al. Intraoperative subcortical motor evoked potential stimulation: how close is the corticospinal tract? *J Neurosurg* 2015;123(3):711–20. DOI: 10.3171/2014.10.JNS141289.
35. Ohue S., Kohno S., Inoue A. et al. Accuracy of diffusion tensor magnetic resonance imaging-based tractography for surgery of gliomas near the pyramidal tract: a significant correlation between subcortical electrical stimulation and postoperative tractography. *Neurosurgery* 2012;70(2):283–93. DOI: 10.1227/NEU.0b013e31823020e6.
36. Nossek E., Korn A., Shahar T. et al. Intraoperative mapping and monitoring of the corticospinal tracts with neurophysiological assessment and 3-dimensional ultrasonography-based navigation. *J Neurosurg* 2011;114(3):738–46. DOI: 10.3171/2010.8.JNS10639.
37. Plans G., Fernandez-Conejero I., Rifa-Ros X. et al. Evaluation of the high-frequency monopolar stimulation

- technique for mapping and monitoring the corticospinal tract in patients with supratentorial gliomas. A proposal for intraoperative management based on neurophysiological data analysis in a series of 92 patients. *Neurosurgery* 2017;81(4):585–94. DOI: 10.1093/neuros/nyw087.
38. Seidel K., Beck J., Stieglitz L. et al. The warning-sign hierarchy between quantitative subcortical motor mapping and continuous motor evoked potential monitoring during resection of supratentorial brain tumors. *J Neurosurg* 2013;118(2):287–96. DOI: 10.3171/2012.10.JNS12895.
39. Raabe A., Beck J., Schucht P., Seidel K. Continuous dynamic mapping of the corticospinal tract during surgery of motor eloquent brain tumors: evaluation of a new method. *J Neurosurg* 2014;120(5):1015–24. DOI: 10.3171/2014.1.JNS13909.
40. Shiban E., Krieg S.M., Obermueller T. et al. Continuous subcortical motor evoked potential stimulation using the tip of an ultrasonic aspirator for the resection of motor eloquent lesions. *J Neurosurg* 2015;123(2):301–6. DOI: 10.3171/2014.11.JNS141555.
41. Javadi S.A., Nabavi A., Giordano M. et al. Evaluation of diffusion tensor imaging-based tractography of the corticospinal tract: a correlative study with intraoperative magnetic resonance imaging and direct electrical subcortical stimulation. *Neurosurgery* 2017;80(2):287–99. DOI: 10.1227/NEU.0000000000001347.
42. Mandonnet E., Winkler P.A., Duffau H. Direct electrical stimulation as an input gate into brain functional networks: principles, advantages and limitations. *Acta Neurochir (Wien)* 2010;152(2):185–93. DOI: 10.1007/s00701-009-0469-0.
43. Riva M., Fava E., Gallucci M. et al. Monopolar high-frequency language mapping: can it help in the surgical management of gliomas? A comparative clinical study. *J Neurosurg* 2016;124(5):1479–89. DOI: 10.3171/2015.4.JNS14333.
44. Косырькова А.В., Горайнов С.А., Огурцова А.А. и др. Сравнительный анализ поточечного моно- и биполярного картирования пирамидного тракта у пациентов с супратенториальными опухолями, прилежащими к моторным зонам головного мозга: сравнение данных в 64 точках стимуляции. Журнал «Вопросы нейрохирургии» им. Н.Н. Бурденко 2020;84(5):29–40. [Kosyrkova A.V., Goryainov S.A., Ogurtsova A.A. et al. Comparative analysis of mono- and bipolar pyramidal tract mapping in patients with supratentorial tumors adjacent to motor areas: comparison of data at 64 stimulation points. *Zhurnal Voprosy Neurokhirurgii im. N.N. Burdenko = Burdenko's Journal of Neurosurgery* 2020;84(5):29–40. (In Russ.)]. DOI: 10.17116/neiro20208405129.
45. Kombos T., Suess O., Funk T. et al. Intraoperative mapping of the motor cortex during surgery in and around the motor cortex. *Acta Neurochir (Wien)* 2000;142(3):263–8. DOI: 10.1007/s007010050034.

Вклад авторов

А.Ю. Дмитриев: разработка дизайна исследования, литературный обзор, написание статьи;
М.В. Синкин: разработка дизайна исследования, научное редактирование статьи;
В.Г. Дашьян: научное редактирование статьи.

Authors' contributions

A.Yu. Dmitriev: research design of the study, literature review, article writing;
M.V. Sinkin: research design of the study, scientific editing of the article;
V.G. Dashyan: scientific editing of the article.

ORCID авторов / ORCID of authors

А.Ю. Дмитриев / A.Yu. Dmitriev: <https://orcid.org/0000-0002-7635-9701>
М.В. Синкин / M.V. Sinkin: <https://orcid.org/0000-0001-5026-0060>
В.Г. Дашьян / V.G. Dashyan: <https://orcid.org/0000-0002-5847-9435>

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Финансирование. Исследование проведено без спонсорской поддержки.

Financing. The study was performed without external funding.