



ИНТРАОПЕРАЦИОННЫЙ НЕЙРОФИЗИОЛОГИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ В ХИРУРГИИ ОПУХОЛЕЙ ГОЛОВНОГО МОЗГА СУПРАТЕНТОРИАЛЬНОЙ ЛОКАЛИЗАЦИИ. ЧАСТЬ 2. ИССЛЕДОВАНИЕ СЕНСОРНОЙ ПРОВОДИМОСТИ, ВЛИЯНИЕ НА ИСХОДЫ И ОГРАНИЧЕНИЯ МЕТОДА

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. Десятская, 20, стр. 1

Контакты: Александр Юрьевич Дмитриев dmitriev@neurosklif.ru

Введение. Среди методов оценки чувствительного проведения при интраоперационном нейромониторинге в хирургии супратенториальных опухолей наиболее часто применяют фазово-реверсивные соматосенсорные вызванные потенциалы, чтобы определить локализацию центральной борозды. Уникальность метода заключается в возможности его применения у больных с грубым парезом перед операцией; чувствительность достигает 97 %, но снижается при расположении опухоли в роландовой борозде.

При мониторинговании зрительных вызванных потенциалов оценивают целостность зрительных проводящих путей, что актуально при новообразованиях затылочной и задних отделов височных долей. Информативность зрительных вызванных потенциалов достигает 94 %. В отличие от картирования зрительных проводящих путей данный метод более объективен, так как не основан на субъективных ощущениях пациента и может применяться у больных в наркозе.

Применение интраоперационного нейромониторинга в 2–5 раз повышает радикальность резекций опухолей функционально значимых зон головного мозга и в 2 раза снижает количество стойких неврологических нарушений после операции.

Точность интраоперационного нейромониторинга снижается при ревизионных операциях и ишемическом повреждении головного мозга вследствие ангиоспазма. Для сохранения высокой прогностической значимости метода количество мониторируемых мышц должно быть обратно пропорционально плотности проводящих путей в зоне операции.

Ключевые слова: интраоперационный нейрофизиологический мониторинг, соматосенсорные вызванные потенциалы, зрительные вызванные потенциалы, опухоль функционально значимой зоны, радикальность резекции, функциональные исходы

Для цитирования: Дмитриев А.Ю., Синкин М.В., Дашьян В.Г. Интраоперационный нейрофизиологический мониторинг в хирургии опухолей головного мозга супратенториальной локализации. Часть 2. Исследование сенсорной проводимости, влияние на исходы и ограничения метода. Нейрохирургия 2022;24(3):73–9. DOI: 10.17650/1683-3295-2022-24-3-73-79

Intraoperative neuromonitoring in surgery of supratentorial brain tumors. Part 2. Assessment of sensory conductivity, impact at outcomes and method restrictions

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

Among methods of assessment of sensory conductivity of neuromonitoring in surgery of supratentorial tumors somatosensory evoked potential phase reversal are used most commonly to identify location of central sulcus. Method's uniqueness lies in possibility of its usage in patients with severe paresis before operation. Its sensitivity reaches 97 % but decreases with tumor location in Rolandic area.

In monitoring of visual evoked potentials integrity of visual pathways are estimated, that is actually in lesions of occipital and posterior temporal lobes. Accuracy of visual evoked potentials reaches 94 %. In contrast to mapping of visual pathways method is more unbiased because is not founded on subjective patient's feelings and can be applied in general anesthesia.

Neuromonitoring's usage increases extent of eloquent tumor resection in 2 to 5 times and decreases the number of permanent neurological deficit in 2 times after surgery.

Accuracy of neuromonitoring decreases in reoperations and in ischemic damage due to angiospasm. To maintain high predictive value of the method amount of monitoring muscles should be inverse proportionally to the density of subcortical pathways in area of resection.

Keywords: intraoperative neuromonitoring, intraoperative neurophysiological monitoring, somatosensory evoked potential, visual evoked potentials, tumor of eloquent brain area, extent of resection, functional outcomes

For citation: Dmitriev A. Yu., Sinkin M. V., Dashyan V. G. Intraoperative neuromonitoring in surgery of supratentorial brain tumors. Part 2. Assessment of sensory conductivity, impact at outcomes and method restrictions. *Neyrokhirurgiya = Russian Journal of Neurosurgery* 2022;24(3):73–9. (In Russ.). DOI: 10.17650/1683-3295-2022-24-3-73-79

ВВЕДЕНИЕ

Широкое внедрение интраоперационного нейрофизиологического мониторинга (ИОНМ) повысило радикальность и улучшило функциональные исходы резекции внутримозговых опухолей [1]. Его применение расширило показания к удалению новообразований, расположенных в функционально значимых зонах (ФЗЗ) головного мозга [2]. Описана стратегия супратотального удаления глиом низкой степени злокачественности, границы резекции которых устанавливают на основании не анатомических данных, а результатов интраоперационного картирования мозга, удаляя все, что расположено вне функционально значимых центров [3, 4].

У больных в наркозе обычно проводят мониторинг моторных проводящих путей, так как функция движения в наибольшей степени определяет качество жизни пациента. В отличие от спинальной хирургии, оценке чувствительной проводимости при резекции супратенториальных опухолей придают меньшее значение, ограничиваясь оценкой фазово-реверсивных соматосенсорных (ССВП) и зрительных вызванных потенциалов (ЗВП) [5].

Принцип оценки сенсорной проводимости основан на стимуляции периферических отделов анализатора и регистрации ответов от мозговых центров. Для нейрофизиологического мониторинга во время операций по поводу опухолей головного мозга супратенториальной локализации исследуют ССВП и ЗВП. Мониторинг ССВП применяют для оценки повреждения чувствительных центров и проводящих путей. Модификацию метода с оценкой реверсии фазы используют для обнаружения центральной борозды. При регистрации ЗВП оценивают сохранность зрительных центров и подкорковых трактов [6].

СОМАТОСЕНСОРНЫЕ ВЫЗВАННЫЕ ПОТЕНЦИАЛЫ

Соматосенсорные вызванные потенциалы представляют собой способ мониторинга целостности

первичных центров тактильной и глубокой чувствительности и соматосенсорных проводящих путей. При исследовании этих зон стимулируют периферические чувствительные или смешанные нервы, а ответ регистрируют посредством скальповых (чаще) или корковых (реже) электродов, установленных в проекции постцентральной извилины. Для оценки путей глубокой чувствительности от рук стимулирующие электроды обычно устанавливают в область запястья в проекции срединного нерва. Сенсорную проводимость от ног проверяют при электростимуляции большеберцового нерва в области внутренней лодыжки [7]. Обычно ССВП применяют при удалении опухолей ствола и спинного мозга, а в хирургии супратенториальных объемных образований используют реже из-за отсутствия влияния на ход вмешательства даже при появлении электрографических нарушений.

ФАЗОВО-РЕВЕРСИВНЫЕ СОМАТОСЕНСОРНЫЕ ВЫЗВАННЫЕ ПОТЕНЦИАЛЫ

Данную методику применяют для локализации центральной борозды и относят к методам картирования. Этот способ выявления постцентральной извилины впервые описан S. Goldring (1978) и в работе E. M. Gregorie и S. Goldring (1984) [8, 9]. Для этого проводят чрескожную стимуляцию контрлатеральной стороне картирования срединного нерва в области запястного канала повторяющимися электрическими импульсами с частотой 3,17 Гц, продолжительностью импульса 0,3 мс и силой тока 10–25 мА. В ответ приблизительно через 20 мс возникает вызванный сенсорный потенциал на поверхности постцентральной извилины, который регистрируют корковым многоконтактным электродом. Этот электрод необходимо устанавливать перпендикулярно ходу предполагаемой центральной борозды в проекции функциональной зоны кисти. По контактам, расположенным над прецентральной

извилиной, корковый компонент будет обладать положительной полярностью, а над постцентральной – отрицательной. Таким образом, центральная борозда будет располагаться между электродами, по отведениям от которых произошла реверсия полярности кортикального ответа. Важно, чтобы у больного не было нейропатии срединного нерва, ухудшающей проводимость. При отсутствии выделяемых компонентов ответов необходимо исключить смещение электродов и оценить глубину наркоза [10, 11].

Обычно для регистрации реверсии фазы ССВП применяют силиконовую пластину с 4 последовательно расположенными электродами. Другой способ – использование 8-электродной сетки, в которой электроды расположены по 4 в 2 ряда. Последний повышает точность метода и позволяет уменьшить силу тока при последующей корковой стимуляции, что снижает вероятность интраоперационных судорог [12].

Чувствительность метода составляет 57–97 %, а при его комбинации с корковой стимуляцией для оценки моторного проведения достигает 100 % [11, 13]. Методика технически проста, может быть выполнена пациентам с наличием металлоимплантов в организме, клаустрофобией, психическими нарушениями и детям. А. М. Lascano и соавт. (2014) сравнили точность локализации роландовой борозды с помощью скальповых ССВП, зарегистрированных увеличенным количеством электродов, с результатами функциональной магнитно-резонансной томографии (фМРТ) у 18 добровольцев и с прямой корковой стимуляцией у 6 пациентов с эпилепсией. Среднее расстояние в локализации центральной борозды между этими методами составило 13 мм. При этом наибольшее несоответствие (до 21 мм) авторы наблюдали в латерально-медиальном направлении. По их мнению, данное различие обусловлено тем, что ССВП регистрируют в более медиальных участках центральной борозды, куда сигнал поступает быстрее. Результаты фМРТ и прямой корковой стимуляции отражают локализацию функций латерально расположенной коры, где информация интегрируется позднее [14].

Важный недостаток метода – снижение точности при расположении объемных образований около центральной борозды (чувствительность в локализации роландовой борозды – 73 %), при значимом перифокальном отеке данной локализации (чувствительность – 55 %) и деструктивном характере патологии (чувствительность – 42 %). При наличии этих факторов также увеличивается продолжительность выполнения метода (с 3 до 7 мин). Применение фазово-реверсивных ССВП позволяет быстро лоцировать примерное место первичной моторной зоны, тем самым облегчив последующую прямую стимуляцию коры и снизив риск интраоперационных судорог. Но при наличии патологического образования в области центральной борозды данный метод может оказаться

неэффективным, и у таких больных следует сразу после вскрытия твердой мозговой оболочки переходить к прямой кортикальной стимуляции [10].

Исследование фазово-реверсивных ССВП – единственный метод идентификации роландовой борозды у больных с глубоким парезом, но без выраженных чувствительных нарушений [13]. У детей данный метод предпочтительнее исследования моторного вызванного потенциала (МВП), так как неполное формирование миелиновой оболочки вокруг проводящих путей затрудняет точное определение порога возникновения МВП [15].

ЗРИТЕЛЬНЫЕ ВЫЗВАННЫЕ ПОТЕНЦИАЛЫ

Регистрация ЗВП – это метод мониторинга функциональной целостности зрительного тракта. Его применяют при удалении опухолей задних отделов височной и затылочной долей. При отсутствии грубого нарушения зрения информативность ЗВП составляет 94 % [16]. Исследование ЗВП объективнее электростимуляции зрительной коры (не основано на ощущениях пациента), и его можно применять больным под наркозом [17].

Для регистрации ЗВП используют как скальповые, так и кортикальные электроды. Недостаток первых в том, что из-за эффекта объемного проведения выполняемой ими записи активности головного мозга им присущи низкая амплитуда, невысокая точность и нестабильность сигнала. Поэтому для увеличения отношения сигнал/шум требуется длительная регистрация (1–2 мин). Кортикальные электроды лишены этих недостатков, дают амплитуду сигнала в 10 раз выше по сравнению со скальповыми и более устойчивый ответ, который к тому же может быть получен в течение 10 с. Наибольшую стабильность ответа наблюдают при близкой установке кортикальных электродов к шпорной борозде. В случае спаечного процесса между головным мозгом и твердой мозговой оболочкой электроды устанавливают эпидурально, а при расположении трепанационного дефекта вне полюса затылочной доли допустимо наложить дополнительные фрезевые отверстия или выполнить миникраниотомию для их установки [16].

При откидывании кожно-апоневротического лоскута на область лица и глаз возможно смещение стимулирующих светодиодов. Для предотвращения этого применяют ретинографию, исчезновение потенциалов которой свидетельствует об экстракраниальной технической проблеме. Такой же эффект может развиваться при выраженных зрительных нарушениях у пациента до операции вследствие сдавления или разрушения оптических путей. Сохранение ретинограммы при снижении амплитуды ЗВП указывает на интракраниальную причину. Чтобы предотвратить блокаду проведения по 3 синапсам в составе оптического пучка, применяют наркоз без миорелаксантов [18].

Для стимуляции зрительного рецептора у больных в наркозе используют очки или адгезивные диски со светодиодами, генерирующими яркие вспышки с частотой 1 Гц. Стойкая потеря ответа при ЗВП свидетельствует о повреждении проводящих путей и точно прогнозирует нарушение зрения после операции [19, 20]. В этом случае хирургические манипуляции в данной области следует приостановить. Временное снижение амплитуды ЗВП на 50 % и более с последующим полным восстановлением обычно не приводит к развитию послеоперационных зрительных нарушений, а сохранность амплитуды кортикального компонента ответа ЗВП в течение всей операции служит предиктором сохранности зрения [16, 18, 20].

Снижение амплитуды ЗВП отражает грубое снижение остроты зрения или его выпадение по типу гемианопсии. Нарушения по типу квадрантопии можно не обнаружить при мониторинге ЗВП. Изменения ЗВП могут происходить как за счет прямого повреждения зрительных путей, так и вследствие нарушения их кровоснабжения [20].

Хирургия с мониторингом ЗВП позволяет не только предотвратить ухудшение, но и улучшить зрительную функцию, даже при злокачественных опухолях затылочной доли. Регистрация ЗВП дает возможность определить место наиболее безопасной кортикотомии и прогнозировать динамику восстановления зрения после операции [5].

Для запуска потенциала действия вдоль зрительного тракта вместо стимулирующих вспышек света можно применять эпидуральные игольчатые электроды, устанавливаемые вдоль зрительных нервов. Получаемые при этом ответы с коры более стабильные, чем в случае очков со светодиодами. Однако этот метод может быть использован лишь при хирургии основания черепа, так как требует особого доступа к каналу зрительного нерва. Такая краниотомия не распространяется на затылочную кору, поэтому вместо корковых электродов в таких случаях применяют скальповые. Недостаток метода – необходимость резекции крыши зрительного канала и наклоненного отростка для доступа к зрительному нерву, что удлиняет операцию и делает ее более травматичной [21].

ВЛИЯНИЕ НЕЙРОМОНИТОРИНГА НА ИСХОДЫ НЕЙРОХИРУРГИЧЕСКИХ ВМЕШАТЕЛЬСТВ

Длительно существующие патологические образования ФЗЗ вызывают смещение этих зон. Данный эффект пластичности мозга наиболее изучен для артериовенозных мальформаций и доброкачественных глиом [22, 23]. Прямая электростимуляция коры позволяет обнаружить этот сдвиг и повысить радикальность операции. При глиомах низкой степени злокачественности смещение мозговых центров в сторону от опухоли увеличивает полноту ее резекции, сопоставимую с но-

вообразованиями функционально незначимых зон (91 и 93 % соответственно). При расположении функциональной области внутри новообразования применение ИОНМ повышает радикальность удаления глиомы с 32 до 59 % [1].

Применение корковой стимуляции при резекции опухолей прецентральных извилин позволяет увеличить радикальность операции и снизить количество стойких неврологических нарушений [24]. При резекции глиом ФЗЗ высокой степени злокачественности под контролем ИОНМ их тотальное удаление возможно в 74 % случаев. Ухудшение состояния после операции происходит в 10 %, но глубокая инвалидизация – лишь в 3 %. Динамика состояния после операции зависит от наличия неврологических нарушений до нее: если они были, то ухудшение состояния возникает в 68 %, если их не было – в 8 % [25, 26]. Применение нейростимуляции при удалении опухолей значимых зон субкортикальной локализации приводит к неврологическим расстройствам в 7 % случаев, базальных ядер – в 18 %. Но у большинства пациентов новые симптомы регрессируют в течение 3 мес. Совместное применение ИОНМ и интраоперационной флуоресценции (с 5-аминолевулиновой кислотой) позволяет достичь радикального удаления поверхностно расположенных глиом в 93 %, а новообразований глубоких отделов – в 59 % случаев [27].

При резекции глиом низкой степени злокачественности нейростимуляция повышает количество тотальных резекций с 5 до 25 %, а субтотальных – с 37 до 51 %. Количество стойких неврологических нарушений снижается с 17 до 6 %. Применение нейрофизиологического мониторинга расширяет показания к удалению глиом ФЗЗ мозга, включая опухоли островковой доли, дополнительной двигательной зоны, премоторной коры и речевых центров [28].

По данным D.G. Southwell и соавт. (2018), любую глиому больших полушарий можно считать операбельной при технической возможности проведения корковой и подкорковой стимуляции. Удалив 58 новообразований, ранее считавшихся неоперабельными, авторы не выявили нарастания неврологических нарушений ни в одном наблюдении, однако тотальное удаление удалось провести лишь в 29 % случаев, при этом лишь 1 опухоль располагалась в подкорковых ядрах. Таким образом, вопрос о хирургии глиом глубоких структур мозга, даже с применением ИОНМ, остается дискуссионным [2].

Наиболее крупный метаанализ эффективности интраоперационного ИОНМ опубликован P. C. de Witt Hamer и соавт. (2012). В него вошли 90 публикаций с описанием 8091 больного. Согласно его результатам при применении ИОНМ чаще возникают временные неврологические нарушения, что обусловлено более частым его использованием при глиомах ФЗЗ. Но стойкие неврологические дисфункции после электростимуляции

развиваются в 2 раза реже – в 3,4 %, тогда как без нее – в 8,2 % наблюдений. Метод нейрофизиологии позволяет повысить радикальность резекции глиом с 58 до 75 %. Следует рассматривать ИОНМ как стандарт в хирургии глиом Ф33. Его использование нецелесообразно лишь в том случае, если предполагаемая продолжительность жизни пациента менее 3 мес, поскольку у такого больного просто не успеют регрессировать временные неврологические нарушения после операции [29].

ОГРАНИЧЕНИЯ ИНТРАОПЕРАЦИОННОГО НЕЙРОФИЗИОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА

Прямая электростимуляция коры позволяет обнаружить функциональные зоны не во всем мозге, а лишь в той его части, над которой проведена трепанация черепа, что затрудняет восприятие пространственных взаимоотношений нейрохирургом [3].

Изолированное использование субкортикального картирования не дает возможности обнаружить место повреждения кортико-спинального тракта проксимальнее области стимуляции. В этом случае мониторинг транскраниальных или кортикальных МВП и ССВП дает возможность непрерывно оценивать целостность проводящих путей во время резекции новообразований [3].

Инфильтрация подкорковых трактов опухолью, глиоз, рубцовая ткань от предыдущей операции или изменения после проведенной лучевой и химиотерапии меняют импеданс головного мозга и нарушают проведение по нему электрического тока. При глиомах островковой доли влияние на электрическую проводимость оказывает вазоспазм. Указанные изменения влияют на глубину проникновения электрического тока и могут оказать влияние на результаты картирования [30]. Предварительное применение трактографии в сложных случаях позволяет увеличить надежность локализации проводящих путей [31].

Информативность нейрофизиологического мониторинга может быть снижена из-за регистрации МВП от недостаточного количества мышц. Например, одна из распространенных ошибок – отсутствие регистрирующих электродов на проксимальных мышцах конечностей. Не всегда очевидно, какие мышцы следует исследовать при расположении опухоли в участках с малой плотностью проводящих путей, таких как область выше лучистого венца. У этих пациентов

высока вероятность появления фокальных неврологических нарушений после операции. И напротив, при глиомах, расположенных ниже лучистого венца или в области островковой доли с высокой плотностью проводящих путей, мониторинг всего лишь отдельных мышц верхней конечности может быть репрезентативным для исследования всей половины тела [32].

При выполнении корковой и подкорковой стимуляции обычно определяют безопасное место резекции. Но послеоперационные неврологические нарушения могут возникать также вследствие ретракционной травмы или повреждения перфорантных артерий, что не может быть учтено при картировании [33].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Во время микрохирургического удаления внутримозговых опухолей супратенториальной локализации для оценки соматосенсорной проводимости применяют соматосенсорные вызванные потенциалы. Зрительные вызванные потенциалы регистрируют для мониторинга функционального состояния зрительных центров и проводящих путей при опухолях затылочной и задних отделов височной долей.

Для локализации прецентральной и постцентральной извилин применяют оценку реверсии фазы соматосенсорных вызванных потенциалов. Метод обладает высокой точностью, но его чувствительность снижается при расположении опухоли в области роландовой борозды.

Применение интраоперационного нейрофизиологического мониторинга повышает радикальность операции и снижает количество стойких неврологических нарушений. Однако рубцовые изменения при повторных хирургических вмешательствах и ангиоспазм снижают точность метода за счет повышения импеданса ткани мозга. Для точного прогнозирования функциональных исходов число мышц, в которых регистрируют моторный вызванный потенциал, должно соответствовать плотности проводящих путей в зоне хирургических манипуляций: чем ниже плотность подкорковых трактов, тем больше мышц следует мониторировать.

Несмотря на указанные недостатки, интраоперационный нейрофизиологический мониторинг *de facto* служит «золотым стандартом» в обнаружении функционально значимых центров головного мозга и подкорковых проводящих путей. Его комбинация с функциональной нейронавигацией облегчает пространственную ориентацию хирурга.

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

- Chang E.F., Clark A., Smith J.S. et al. Functional mapping-guided resection of low-grade gliomas in eloquent areas of the brain: improvement of long-term survival. *J Neurosurg* 2011;114(3): 566–73. DOI: 10.3171/2010.6.JNS091246
- 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
- Duffau H. Lessons from brain mapping in surgery for low-grade glioma: insights into associations between tumour and brain plasticity. *Lancet Neurol* 2005;4(8):476–86. DOI: 10.1016/S1474-4422(05)70140-X
- Duffau H. Long-term outcomes after supratotal resection of diffuse low-grade gliomas: a consecutive series with 11-year follow-up. *Acta Neurochir (Wien)* 2016;158(1):51–8. DOI: 10.1007/s00701-015-2621-3
- Маряшев С.А., Огурцова А.А., Домбаанай Б.С. и др. Интраоперационная регистрация корковых зрительных вызванных потенциалов при удалении глиомы затылочной доли. Клиническое наблюдение и обзор литературы. Журнал «Вопросы нейрохирургии» им. Н.Н. Бурденко 2020;84(6):93–100. DOI: 10.17116/neiro20208406193
Maryashev S.A., Ogurtsova A.A., Dombaanay B.S. et al. Occipital gliomas. Case report and literature review. *Zhurnal voprosy neurokhirurgii im. N.N. Burdenko = Burdenko's Journal of Neurosurgery* 2020;84(6):93–100. (In Russ.). DOI: 10.17116/neiro20208406193
- Cruccu G., Aminoff M.J., Curio G. et al. Recommendations for the clinical use of somatosensory-evoked potentials. *Clin Neurophysiol* 2008;119(8):1705–19. DOI: 10.1016/j.clinph.2008.03.016
- MacDonald D.B., Dong C., Quatralo R. et al. Recommendations of the International Society of Intraoperative Neurophysiology for intraoperative somatosensory evoked potentials. *Clin Neurophysiol* 2019;130(1):161–79. DOI: 10.1016/j.clinph.2018.10.008
- Goldring S. A method for surgical management of focal epilepsy, especially as it relates to children. *J Neurosurg* 1978;49(3):344–56. DOI: 10.3171/jns.1978.49.3.0344
- Gregorie E.M., Goldring S. Localization of function in the excision of lesions from the sensorimotor region. *J Neurosurg* 1984;61(6):1047–54. DOI: 10.3171/jns.1984.61.6.1047
- Sheth S.A., Eckhardt C.A., Walcott B.P. et al. Factors affecting successful localization of the central sulcus using the somatosensory evoked potential phase reversal technique. *Neurosurgery* 2013;72(5):828–34. DOI: 10.1227/NEU.0b013e3182897447
- Kombos T., Suess O., Funk T. et al. Intra-operative 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
- Jahangiri F.R., Sherman J.H., Sheehan J. et al. Limiting the current density during localization of the primary motor cortex by using a tangential-radial cortical somatosensory evoked potentials model, direct electrical cortical stimulation, and electrocorticography. *Neurosurgery* 2011;69(4):893–8. DOI: 10.1227/NEU.0b013e31822230ac3
- Ostry S., Netuka D., Benes V. Rolandic area meningioma resection controlled and guided by intraoperative cortical mapping. *Acta Neurochir (Wien)* 2012;154(5):843–53. DOI: 10.1007/s00701-012-1279-3
- Lascano A.M., Grouiller F., Genetti M. et al. Surgically relevant localization of the central sulcus with high-density somatosensory-evoked potentials compared with functional magnetic resonance imaging. *Neurosurgery* 2014;74(5):517–26. DOI: 10.1227/NEU.0000000000000298
- Bartos R., Jech R., Vymazal J. et al. Validity of primary motor area localization with fMRI versus electric cortical stimulation: a comparative study. *Acta Neurochir (Wien)* 2009;151(9):1071–80. DOI: 10.1007/s00701-009-0368-4
- Ota T., Kawai K., Kamada K. et al. Intraoperative monitoring of cortically recorded visual response for posterior visual pathway. *J Neurosurg* 2010;112(2):285–94. DOI: 10.3171/2009.6.JNS081272
- Duffau H., Velut S., Mitchell M.C. et al. Intra-operative mapping of the subcortical visual pathways using direct electrical stimulations. *Acta Neurochir (Wien)* 2004;146(3):265–9; discussion 269–70. DOI: 10.1007/s00701-003-0199-7
- Sasaki T., Itakura T., Suzuki K. et al. Intraoperative monitoring of visual evoked potential: introduction of a clinically useful method. *J Neurosurg* 2010;112(2):273–84. DOI: 10.3171/2008.9.JNS08451
- Kamada K., Todo T., Morita A. et al. Functional monitoring for visual pathway using real-time visual evoked potentials and optic-radiation tractography. *Neurosurgery* 2005;57(Suppl 1): 121–7. DOI: 10.1227/01.neu.0000163526.60240.b6
- Kodama K., Goto T., Sato A. et al. Standard and limitation of intraoperative monitoring of the visual evoked potential. *Acta Neurochir (Wien)* 2010;152(4):643–8. DOI: 10.1007/s00701-010-0600-2
- Benedicic M., Bosnjak R. Intraoperative monitoring of the visual function using cortical potentials after electrical epidural stimulation of the optic nerve. *Acta Neurochir (Wien)* 2011;153(10):1919–27. DOI: 10.1007/s00701-011-1098-y
- Picart T., Herbet G., Moritz-Gasser S., Duffau H. Iterative surgical resections of diffuse glioma with awake mapping: how to deal with cortical plasticity and connectomal constraints? *Neurosurgery* 2019;85(1):105–16. DOI: 10.1093/neuros/nyy218
- Deng X., Zhang Y., Xu L. et al. Comparison of language cortex reorganization patterns between cerebral arteriovenous malformations and gliomas: a functional MRI study. *J Neurosurg* 2015;122(5):996–1003. DOI: 10.3171/2014.12.JNS14629
- Улитин А.Ю., Александров М.В., Мальшев С.М. и др. Эффективность интраоперационного моторного картирования при резекции опухолей центральных извилин. Российский нейрохирургический журнал им. проф. А.Л. Поленова 2017;9(1):57–62. Ulitin A.Yu., Aleksandrov M.V., Malyshev S.M. et al. Effectiveness of intraoperative motor mapping during resection of rolandic brain tumors. *Rossiiskii neurokhirurgicheskii zhurnal im. prof. A.L. Polenova = The Russian Neurosurgical Journal named after prof. A.L. Polenov* 2017;9(1):57–62. (In Russ.).
- Puppa A.D., de Pellegrin S., d'Avella E. et al. 5-aminolevulinic acid (5-ALA) fluorescence guided surgery of high-grade gliomas in eloquent areas assisted by functional mapping. Our experience and review of the literature. *Acta Neurochir (Wien)* 2013;155(6):965–72. DOI: 10.1007/s00701-013-1660-x
- Schucht P., Beck J., Abu-Isa J. et al. Gross total resection rates in contemporary glioblastoma surgery: results of an institutional protocol combining 5-aminolevulinic acid intraoperative fluorescence imaging and brain mapping. *Neurosurgery* 2012;71(5):927–35; discussion 935–6. DOI: 10.1227/NEU.0b013e31826d1e6b
- Pastor J., Vega-Zelaya L., Pulido P. et al. Role of intraoperative neurophysiological monitoring during fluorescence-guided resection surgery. *Acta Neurochir (Wien)* 2013;155(12):2201–13. DOI: 10.1007/s00701-013-1864-0
- 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
- de Witt Hamer P.C., Robles S.G., Zwinderman A.H. et al. Impact of intraoperative stimulation brain mapping on glioma surgery outcome: a meta-analysis. *J Clin Oncol* 2012;30(20):2559–65. DOI: 10.1200/JCO.2011.38.4818

30. 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
31. Zhu F.P., Wu J.S., Song Y.Y. et al. Clinical application of motor pathway mapping using diffusion tensor imaging tractography and intraoperative direct subcortical stimulation in cerebral glioma surgery: a prospective cohort study. *Neurosurgery* 2012;71(6): 1170–84. DOI: 10.1227/NEU.0b013e318271bc61
32. 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
33. 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

Вклад авторов

А.Ю. Дмитриев: разработка дизайна исследования, обзор публикаций, написание статьи;

М.В. Синкин: разработка дизайна исследования, редактирование статьи;

В.Г. Дашьян: редактирование статьи.

Authors' contributions

A.Yu. Dmitriev: research design of the study, review of publications, article writing;

M.V. Sinkin: research design of the study, article editing;

V.G. Dashyan: article editing.

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. Работы выполнялись без внешнего финансирования.

Funding. The work was performed without external funding.