

© А. Ю. Щербук, М. Е. Ерошенко, Ю. А. Щербук, 2017
УДК 616.831-006-07

А. Ю. Щербук^{1, 2}, М. Е. Ерошенко^{1, 2}, Ю. А. Щербук²

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ КАРТИРОВАНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНО ЗНАЧИМЫХ ЗОН ГОЛОВНОГО МОЗГА В ХИРУРГИИ ОПУХОЛЕЙ ЦЕНТРАЛЬНЫХ ИЗВИЛИН

¹ ГБУЗ «Санкт-Петербургский клинический научно-практический центр специализированных видов медицинской помощи (онкологический)» (дир. — проф. В. М. Моисеенко); ² кафедра нейрохирургии и неврологии (зав. — акад. РАН Ю. А. Щербук), медицинский факультет, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет»

Ключевые слова: опухоли, моторная зона коры, головной мозг, корково-спинномозговой путь, навигационная транскраниальная магнитная стимуляция, магнитно-резонансная трактография, прямая электрическая стимуляция

A. Yu. Shcherbuk^{1, 2}, M. E. Eroshenko^{1, 2}, Yu. A. Shcherbuk²

Modern methods of functional brain mapping in surgery of tumors of central gyrus

¹ St. Petersburg Clinical Research-Practical Center of Special Medical Care (Oncological); ² Department of neurosurgery and neurology, Medical faculty, St. Petersburg State University

Key words: tumors, motor cortex, brain, corticospinal tract, navigated transcranial magnetic stimulation, direct electrical stimulation

Основная цель оперативного лечения новообразований головного мозга — гистологическая верификация и максимальная хирургическая циторедукция опухоли без появления либо прогрессирования неврологических нарушений в послеоперационном периоде [3, 5, 6, 39]. Удаление опухолей центральных извилин связано с высоким риском повреждения функционально значимых зон, нарастания двигательных нарушений, появления грубых неврологических нарушений в послеоперационном периоде [19, 39]. По данным исследования P.C. De Witt Hamer и соавт. [12], основанного на мета-анализе 90 публикаций (8091 клиническое наблюдение), при удалении супратенториальных глиом ранние неврологические нарушения любой степени выявлены у 30,3% больных, а грубые нарушения — у 22,9%. В настоящее время даже глубоких знаний топографической анатомии головного мозга недостаточно для планирования нейрохирургической операции, так как локализация функционально значимых зон у каждого пациента индивидуальна [1, 2, 5, 46]. Для улучшения результатов лечения, повышения качества и продолжительности жизни больных с опухолями моторной зоны коры в клинической практике все шире применяются новые методы предоперационного планирования, интраоперационной визуализации, метаболической и безрамной нейронавигации, а также нейрофизиологического мониторинга [1, 2, 5, 6, 13, 35, 49].

Прямая электрическая стимуляция. В последние несколько десятилетий основным методом, применяющимся для картирования моторной зоны коры при удалении супратенториальных опухолей головного мозга, является прямая электрическая стимуляция коры. Принцип метода заключается в стимуляции коры последовательными высокочастотными электрическими импульсами с помощью специального электрода. В результате возбуждения мотонейронов возникает вызванный моторный потенциал, латентность и амплитуда которого фиксируются на станции нейрофизиологического мониторинга [21]. Прогностически значимым критерием является снижение амплитуды вызванного моторного потенциала на 50% [43]. Многочисленные исследования доказывают, что метод прямой электрической стимуляции коры является точным и эффективным, что позволило считать его «золотым стандартом» картирования моторной зоны коры при удалении супратенториальных опухолей головного мозга [12, 14]. Некоторые авторы отмечают, что мониторинг вызванных потенциалов при прямой электрической стимуляции коры имеет прогностическое значение в возникновении двигательных нарушений [12, 21, 42].

Для интраоперационной диагностики корково-спинномозгового пути применяют схожий с прямой электрической стимуляцией коры метод подкорковой стимуляции. Выявлена прямая зависимость расстояния между точкой стимуляции

и корково-спинномозговым путём от силы тока электрического стимула. Многие нейрохирурги считают, что пороговое значение стимула силой 1 мА равно приблизительно расстоянию в 1 мм от точки стимуляции до корково-спинномозгового пути [30, 31, 36]. Другие исследователи признают надежность метода в определении близости к корково-спинномозговому пути [10]. По данным некоторых авторов [16, 33], для снижения риска появления неврологических нарушений при удалении опухолей вблизи корково-спинномозгового пути резекцию необходимо останавливать при достижении силы тока электрического стимула, равной 2–3 мА, в результате которого регистрируется вызванный мышечный ответ.

Несмотря на все преимущества данных методов, существуют значительные ограничения в их применении — невозможность использования для предоперационного планирования, определения резектабельности опухоли, объема операции и направления доступа.

Функциональная магнитно-резонансная томография. Одним из первых методов, позволяющих картировать функционально значимые зоны коры на дооперационном этапе, стала функциональная магнитно-резонансная томография (фМРТ). Это непрямой метод определения нейрональной активности, основанный на выявлении эффекта изменения оксигенации крови в определенных участках коры в ответ на выполнение пациентом двигательных или речевых заданий. При сравнении точности и специфичности результатов фМРТ с данными прямой стимуляции коры было доказано, что фМРТ является достаточно надежным методом, позволяющим локализовать моторную зону коры. Она облегчила предоперационное планирование и позволила уменьшить время проведения интраоперационного картирования [1, 2, 24, 34]. В то же время существуют другие исследования, показывающие значительные различия в результатах фМРТ, по сравнению с данными, полученными с помощью прямой стимуляции коры и навигационной транскраниальной магнитной стимуляции (ТМС) [15, 23]. Еще одним недостатком фМРТ, ограничивающим ее применение для предоперационного планирования, является появление нейроваскулярных перестроек в коре, прилежащей к опухоли, что часто приводит к ложнонегативным результатам [47].

Магнитоэнцефалография. Описан еще один метод картирования моторной зоны коры, основанный на выявлении магнитных полей, продуцируемых биоэлектрическими токами во время активации нейронов, — магнитоэнцефалография (МЭГ) [26]. Для того, чтобы обнаружить магнитное поле, генерируемое электрической активностью коры на уровне пико- или фемтотесла, необходимы сверхпроводниковые датчики и экранированные от магнитных воздействий помещения. МЭГ позволяет фиксировать спонтанную активность нейронов и (или) вызванную активность в ответ на определенные стимулы. Карта моторной зоны коры создается путем вычисления последовательностей МЭГ и активности периферической мускулатуры (корково-моторная когерентность) или кинематического сигнала от движения конечностей (корково-кинематический метод) [26]. Совмещение данных МЭГ и МРТ дает возможность применять данную методику для планирования нейрохирургических операций.

Для определения точности данного метода некоторые исследователи сравнивали результаты предоперационного картирования моторной зоны коры с помощью МЭГ и интраоперационной прямой электрической стимуляции коры. В результате была подтверждена высокая надежность МЭГ

[28, 45]. По данным Р.Е. Tagarone и соавт. [45], при сравнении результатов МЭГ, навигационной ТМС и прямой электрической стимуляции коры у пациентов с супратенториальными опухолями головного мозга разница в локализации моторной зоны коры составила не более 2,1–4,7 мм, что подтверждает высокую точность указанных методов. Несмотря на все преимущества, применение МЭГ для картирования моторной зоны коры ограничено по причине ее высокой стоимости и малой доступности. В связи с этим число работ, описывающих применение МЭГ для предоперационного планирования, довольно скудное.

Таким образом, современные методы, применяющиеся для картирования моторной зоны коры на этапе предоперационного планирования, основаны на косвенном обнаружении активации нейронов путем выявления изменения их метаболической (фМРТ) или электрической (МЭГ) активности в ответ на какое-либо действие. В результате этого в зону картирования попадают все области коры, участвующие в выполнении этого действия, включая как функционально значимые, так и функционально незначимые. Характеризуя метод прямой электрической стимуляции коры, следует подчеркнуть, что он ограничен только интраоперационным применением.

Навигационная транскраниальная магнитная стимуляция. В последние 5 лет для предоперационного картирования моторной зоны коры, по данным зарубежных авторов, все чаще и чаще применяется новая уникальная технология — навигационная ТМС [1, 2, 5, 17, 22, 45]. В её основе лежит относительно старый метод — транскраниальная магнитная стимуляция. Это неинвазивная методика, которая используется с 1985 г. для исследования физиологии коры головного мозга и моторных путей [8].

Принцип метода ТМС заключается в следующем. В электромагнитной медной катушке, касающейся кожи головы, создается магнитное поле в результате быстрого изменения тока в катушке. Магнитное поле (до 2 Т) безболезненно проникает через скальп и кости черепа и индуцирует электрическое поле, которое деполяризует нейроны в коре головного мозга. В процессе стимуляции двигательной зоны коры головного мозга возникает моторный потенциал, который может быть зарегистрирован с помощью электромиографии в мышцах, соответствующих области коркового представительства. ТМС может производиться одиночными импульсами, парными импульсами или повторными стимуляциями — ритмическая (повторяющаяся) ТМС. По данным современных руководств [37], единичные и парные импульсы ТМС считаются безопасными [37]. В обновленных руководствах считается безопасной и ритмическая ТМС [38].

Наиболее часто встречающиеся побочные эффекты — это дискомфорт во время стимуляции и головная боль. Кроме того, ТМС воздействует на слух. Быстрая механическая деформация катушки создает обманчиво мягкий, но интенсивный щелчок, который может превышать рекомендованный уровень шума (140 дБ) для слуховой системы. Некоторые авторы рекомендуют использовать средства защиты слуха во время ТМС [38].

Наиболее серьезный, но крайне редкий побочный эффект ТМС — провоцирование эпилептического припадка. По опубликованным данным [38], эпилептиформная активность при записи ЭЭГ во время одиночных и парных стимуляций не отмечалась. Эпилептиформная активность во время ритмической ТМС тоже встречается редко, однако эпилептические

припадки могут возникать при высокочастотной стимуляции [41]. Факторами риска при ТМС-ассоциированных припадках являлись отмена противоэpileптических препаратов и резистентная к препаратам эпилепсия. Во всех случаях возникновения припадков характер приступа и период восстановления были типичными для пациента [41]. На практике у пациентов с ежедневными припадками невозможно отличить, является ли он ТМС-индуцированным или случайным. Низкочастотная ритмическая ТМС (менее 1 Гц), наоборот, обладает тормозящим свойством и может быть использована для уменьшения частоты припадков [11, 40].

Абсолютным противопоказанием для ТМС является наличие в организме обследуемого металлических предметов, таких как кохлеарные имплантаты или ферромагнитные клипсы, которые находятся близко к магнитной катушке. Беременность и эпилепсия тоже упоминаются в руководствах как противопоказание, если риск исследования превышает ожидаемую пользу [38].

Наиболее частые параметры, которые анализируются при ТМС, — это моторный порог, являющийся критерием возбудимости коры [27], а также частота, латентность (время появления вызванного ответа после предъявления стимула) и амплитуда вызванного моторного потенциала. Вызванный моторный потенциал определяется на электромиограмме периферической мышцы, когда импульс ТМС достигает моторной зоны коры. Это прямой способ определения целостности корково-спинномозгового пути и проводимости периферических путей к мышце [37].

Несмотря на широкое применение этого метода, большая вариабельность амплитуды вызванных моторных потенциалов с помощью традиционной ТМС значительно ограничивает применение метода в клинической практике. При исследовании различных заболеваний оставалось неясным, является ли отсутствие моторного потенциала результатом истинного патофизиологического изменения или следствием технически некорректной стимуляции. Неточное расположение магнитной катушки — одна из основных причин вариабельности измерения моторного потенциала. Другая серьезная проблема — сдвиг катушки с оптимальной позиции во время исследования [25, 37, 38].

Интеграция традиционной ТМС с навигационной системой значительно расширила область применения метода, избавила от большинства недостатков и позволила выявлять функционально значимые зоны коры головного мозга. Одиночные импульсы навигационной ТМС используют для картирования моторной зоны коры, в то время как ритмическая ТМС дает возможность выявлять зоны коры, ответственные за речь.

Исследования последних лет доказали клиническую применимость навигационной ТМС для предоперационного картирования моторной зоны коры головного мозга, а также для одновременной оценки нарушений проводимости корково-спинномозгового пути [15, 17, 22, 23, 33, 45]. Некоторые авторы [22, 34, 45] сравнивали результаты картирования моторной зоны коры путем навигационной ТМС с данными прямой электрической стимуляции коры. Их работы подтвердили высокую точность навигационной ТМС.

При дальнейших исследованиях обнаружена важная роль навигационной ТМС в планировании нейрохирургической операции [5, 34, 44]. Результаты картирования моторной зоны коры помогли выбрать правильное направление доступа и оценить объем резекции опухоли еще на этапе планирова-

ния, а также выполнить более радикальное удаление глиом низкой степени злокачественности [16].

Некоторые авторы [17, 22] отметили значимую роль навигационной ТМС в усовершенствовании МР-трактографии. Они применили точки моторной карты в качестве области инициации алгоритма реконструкции трактов («seed points»), что позволило точнее, чем при стандартном способе, построить корково-спинномозговой путь. У данного метода есть и другие преимущества. Навигационная ТМС может быть применена у пациентов в сознании и нацелена на любую точку коры (можно легко проводить сравнение со здоровым полушарием головного мозга), и отдельные мышечные ответы могут быть достигнуты с минимальным риском возникновения припадков.

Навигационная ТМС может применяться одинаково эффективно у парализованных, седатированных, недееспособных пациентов, у которых проведение фМРТ затруднительно, так как метод напрямую зависит от способности выполнять определенные задания. Безопасность навигационной ТМС может быть увеличена за счет проведения во время исследования ЭЭГ-мониторинга для выявления эпилептогенной активности. Навигационная ТМС позволяет пациентам двигать головой и отказаться от использования механических фиксаторов головы, следовательно, большие переносят её более комфортно даже при длительном сеансе.

Таким образом, навигационная ТМС является современным, неинвазивным, безопасным, истинно нейрофизиологическим методом, позволяющим еще на предоперационном этапе точно определить расположение моторной зоны коры с учетом индивидуальных особенностей каждого пациента, а также косвенно судить о целостности нисходящих двигательных путей. Тем не менее, данный метод не позволяет визуализировать проводящие пути белого вещества головного мозга.

Магнитно-резонансная трактография. Единственной неинвазивной методикой, с помощью которой можно локализовать корково-спинномозговые пути, исходящие из моторной зоны коры, а также определить расположение опухоли относительно них, является магнитно-резонансная трактография (МР-трактография) [4, 18]. МР-трактография (диффузионно-тензорная визуализация, DTI) — МРТ-технология, основанная на концепции анизотропной диффузии воды в миелинизированных волокнах. Клеточные мембраны и органеллы препятствуют свободному движению молекул воды в головном мозге, заставляя их двигаться в определенном направлении, что называется анизотропией. Ориентация волокон белого вещества головного мозга вызывает анизотропию, потому что диффузия воды происходит параллельно волокнам проводящих путей, так как их миелиновая оболочка служит барьером [7]. Диффузионный тензор — трехмерная эллипсоидная модель диффузии молекул воды, показывающая ее направление (анизотропию) и косвенно отображающая направление проводящих путей белого вещества головного мозга [20]. В результате данные представляются в виде цветной карты, где цветовой оттенок означает направление диффузии [29].

МР-трактография позволяет выполнять трехмерную реконструкцию и визуализацию проводящих путей белого вещества головного мозга [4, 20], а также оценить их пространственное взаимоотношение с опухолью. Многие авторы отметили важную роль МР-трактографии в предоперационной оценке целостности корково-спинномозгового пути [4, 9,

10, 29, 31]. Другие исследователи сравнивали пред- и интраоперационную МР-трактографию с прямой подкорковой стимуляцией корково-спинномозгового пути и выявили тесную корреляцию полученных данных [32, 50].

Объемные образования головного мозга, особенно глиомы, могут инфильтрировать проводящие пути или оказывать на них иное влияние, что объективно оценивается с помощью МР-трактографии. Некоторые исследователи выявили, что с помощью МР-трактографии возможно обнаружение волокон, проходящих внутри опухоли [4, 10, 31]. Указанный факт делает описанный метод важным инструментом для оценки объема резекции новообразования на предоперационном этапе. По данным А. Castellano и соавт. [11], при удалении глиом у 73 пациентов в случае инфильтрации и смещения корково-спинномозгового пути опухолью значительно снижалась вероятность ее тотального удаления. J.S. Wu и соавт. [48] описали опыт совмещения данных предоперационной МР-трактографии в навигационной системе при удалении глиом у 238 пациентов. Они выявили, что в группе пациентов, которым проводили МР-трактографию, степень радикальности операции была значительно выше, чем в контрольной группе, а в неврологическом статусе отрицательной динамики не наблюдалось.

D. Frey и соавт. [16] проанализировали 205 оперативных вмешательств с применением компьютерной нейронавигации и МР-трактографии при удалении опухоли, расположенных вблизи корково-спинномозгового пути. Их результаты показали, что у тех пациентов, у которых, по данным МР-трактографии, опухоль определялась на расстоянии более 10 мм от корково-спинномозгового пути, в послеоперационном периоде появления двигательных нарушений отмечено не было.

Основные ограничения использования результатов МР-трактографии в нейронавигационной системе при удалении супратенториальных опухолей — возможное смещение вещества мозга («brain shift») после удаления основного объема новообразования. С. Nimsky и соавт. [29] выявили, что смещение корково-спинномозгового пути во время удаления опухоли варьировало от 8 до 15 мм, причем направление смещения предугадать было невозможно. Вследствие этого МР-трактография может играть важную роль только на этапе предоперационного планирования. По мнению ряда авторов [50], возможно сочетанное использование данных МР-трактографии с нейрофизиологическим интраоперационным контролем с помощью прямой подкорковой стимуляции для снижения риска повреждения корково-спинномозгового пути.

Таким образом, анализ данных отечественных и зарубежных публикаций, обобщивших результаты современных исследований, свидетельствует о вариабельности локализации функционально значимых зон головного мозга. Функциональная анатомия мозга различается у разных людей, а у одного человека может изменяться в течение жизни вследствие нейропластичности и функциональной реорганизации мозга при получении новых навыков или в результате заболеваний. Поэтому добиться позитивных результатов при удалении опухолей головного мозга, опираясь на стандартные топографические ориентиры, довольно сложно.

По данным современных публикаций, посвященных картированию функционально значимых зон головного мозга, наиболее перспективным методом в настоящее время является навигационная ТМС. Несмотря на то, что данный метод

появился относительно недавно, описанные выше публикации доказывают его точность и эффективность. Результаты картирования можно использовать как для предоперационного планирования, так и во время операции после совмещения данных навигационной ТМС и МР-трактографии в нейронавигационной системе.

ЛИТЕРАТУРА [REFERENCE]

1. Баарс Б., Гейдж Н. Мозг, познание, разум : введение в когнитивные нейронауки. Ч. 1 / Под ред. Б. Баарса, Н. Гейдж : пер. с англ. / Под ред. В. В. Шульговского. М.: БИНОМ, 2014. 544 с. [Baars B., Geidzh N. *Mozg, poznanie, razum : vvedenie v kognitivnye neironauki. Ch. 1 / Pod red. B. Baarsa, N. Geidzh : per. s angl. / Pod red. V. V. Shul'govskogo. Moscow : BINOM, 2014. 544 p.*]
2. Баарс Б., Гейдж Н. // Там же. Ч. 2. 464 с. [Baars B., Geidzh N. // *ibid. Ch. 2 / Pod red. B. Baarsa, N. Geidzh : per. s angl. / Pod red. V. V. Shul'govskogo. Moscow : BINOM, 2014. 464 p.*]
3. Коновалов А. Н., Потапов А. А., Гаврилов А. Г., Шухрай В. А., Горяинов С. А., Охлопков В. А., Кобяков Г. Л., Калинин П. Л., Фомичев Д. В., Кутин М. А., Жуков В. Ю., Гольбин Д. А., Зеленков П. В., Хить М. А., Лощенов В. Б., Савельева Т. А., Холодцова М. Н., Ворожцов Н. Г., Кузьмин С. Г., Чехонин В. П. Современные технологии в нейрохирургии // Современные технологии и клинические исследования в нейрохирургии / Под ред. А. Н. Коновалова. М., 2012. Т. 1. С. 55–111 [Konovalov A. N., Potapov A. A., Gavrilov A. G., Shukhrai V. A., Goryainov S. A., Okhlopov V. A., Kobayakov G. L., Kalinin P. L., Fomichev D. V., Kutin M. A., Zhukov V. Yu., Gol'bin D. A., Zelenkov P. V., Khit' M. A., Loshchenov V. B., Savel'eva T. A., Kholodtsova M. N., Vorozhtsov N. G., Kuz'min S. G., Chekhonin V. P. *Sovremennye tekhnologii v neirokhirurgii // Sovremennye tekhnologii i klinicheskie issledovaniya v neirokhirurgii / Pod red. A. N. Konovalova. Moscow, 2012. Vol. 1. P. 55–111.*]
4. Корниенко В. Н., Пронин И. Н., Арутюнов Н. В., Захарова Н. Е., Подопригра А. Е., Серков С. В., Фадеева Л. М., Родионов П. В., Такуш С. В. Нейрорадиология : Современное состояние и перспективы развития // Современные технологии и клинические исследования в нейрохирургии / Под ред. А. Н. Коновалова. М., 2012. Т. 1. С. 113–157 [Kornienko V. N., Pronin I. N., Arutyunov N. V., Zakharova N. E., Podoprigora A. E., Serkov S. V., Fadeeva L. M., Rodionov P. V., Takush S. V. *Neiroradiologiya : Sovremennoe sostoyanie i perspektivy razvitiya // Sovremennye tekhnologii i klinicheskie issledovaniya v neirokhirurgii / Pod red. A. N. Konovalova. Moscow, 2012. Vol. 1. P. 113–157.*]
5. Щербук А. Ю., Ерошенко М. Е., Щербук Ю. А. Комплексное применение высокотехнологичных методов нейрохирургического лечения больных с опухолями моторной зоны коры головного мозга : учебное пособие. СПб., 2016. 112 с. [Shcherbuk A. Yu., Eroshenko M. E., Shcherbuk Yu. A. *Kompleksnoe primeneniye vysokotekhnologichnykh metodov neirokhirurgicheskogo lecheniya bol'nykh s opukholyami motornoj zony kory golovnoy mozga : uchebnoye posobie. St. Petersburg, 2016. 112 p.*]
6. Щербук Ю. А., Щербук А. Ю. Современные организационные, хирургические и реабилитационные технологии в нейроонкологии. СПб.: СПбГУ, 2014. 264 с. [Shcherbuk Yu. A., Shcherbuk A. Yu. *Sovremennye organizatsionnye, khirurgicheskie i reabilitatsionnye tekhnologii v neiroonkologii. St. Petersburg : SPbGU, 2014. 264 p.*]
7. Ahn S., Lee S. K. Diffusion tensor imaging: exploring the motor networks and clinical applications // *Korean J. Radiol.* 2011. Vol. 12, № 6. P. 651–661.
8. Barker A. T., Jalinous R., Freeston I. L. Non-invasive magnetic stimulation of human motor cortex // *Lancet.* 1985. Vol. 1, № 8437. P. 1106–1107.

9. Bauer M.H., Barbieri S., Klein J. et al. Boundary estimation of fiber bundles derived from diffusion tensor images // *Int. J. Comput. Assist. Radiol. Surg.* 2011. Vol. 6, № 1. P. 1–11.
10. Bello L., Riva M., Fava E. et al. Tailoring neurophysiological strategies with clinical context enhances resection and safety and expands indications in gliomas involving motor pathways // *Neuro-Oncol.* 2014. Vol. 16. P. 1110–1128.
11. Castellano A., Bello L., Michelozzi C. et al. Role of diffusion tensor magnetic resonance tractography in predicting the extent of resection in glioma surgery // *Neuro-Oncol.* 2012. Vol. 14, № 2. P. 192–202.
12. 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.* 2002. Vol. 30, № 20. P. 2559–2565.
13. Duffau H. *Diffuse low-grade gliomas in adults* / ed. H. Duffau. London : Springer-Verlag, 2013. 400 p.
14. Duffau H., Lopes M., Arthuis F. Contribution of intraoperative electrical stimulations in surgery of low grade gliomas: a comparative study between two series without (1985–96) and with (1996–2003) functional mapping in the same institution // *J. Neurol. Neurosurg. Psychiatry.* 2005. Vol. 76, № 6. P. 845–851.
15. Forster M.T., Senft C., Hattingen E. et al. Motor cortex evaluation by nTMS after surgery of central region tumors : a feasibility study // *Acta Neurochir (Wien).* 2012. Vol. 154. P. 1351–1359.
16. Frey D., Schilt S., Strack V. et al. Navigated transcranial magnetic stimulation improves the treatment outcome in patients with brain tumors in motor eloquent locations // *Neuro-Oncol.* 2014. Vol. 16. P. 1365–1372.
17. Frey D., Strack V., Wiener E. et al. A new approach for corticospinal tract reconstruction based on navigated transcranial stimulation and standardized fractional anisotropy values // *Neuroimage.* 2012. Vol. 62. P. 1600–1609.
18. Hattingen E., Rathert J., Jurcoane A. et al. A standardised evaluation of pre-surgical imaging of the corticospinal tract : where to place the seed ROI // *Neurosurg. Rev.* 2009. Vol. 32, № 4. P. 445–456.
19. Jakola A.S., Unsgård G., Myrmet K.S. et al. Low grade gliomas in eloquent locations implications for surgical strategy, survival and long term quality of life // *PLoS ONE.* 2012. Vol. 7, № 12. P. e51450.
20. Jellison B.J., Field A.S., Medow J. et al. Diffusion tensor imaging of cerebral white matter: a pictorial review of physics, fiber tract anatomy, and tumor imaging patterns // *Amer. J. Neuroradiol.* 2004. Vol. 25, № 3. P. 356–369.
21. Kombos T., Picht T., Derdikopoulos A., Suess O. Impact of intraoperative neurophysiological monitoring on surgery of high-grade gliomas // *J. Clin. Neurophysiol.* 2009. Vol. 26, № 6. P. 422–425.
22. Krieg S.M., Sabih J., Bulbasova L. et al. Preoperative motor mapping by navigated transcranial magnetic brain stimulation improves outcome for motor eloquent lesions // *Neuro-Oncol.* 2014. Vol. 16. P. 1274–1282.
23. Krieg S.M., Shiban E., Droese D. et al. Predictive value and safety of intraoperative neurophysiological monitoring with motor evoked potentials in glioma surgery // *Neurosurgery.* 2012. Vol. 70, № 5. P. 1060–1071.
24. 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. Vol. 144, № 9. P. 889–899.
25. Landi D., Rossini P.M. Cerebral restorative plasticity from normal ageing to brain diseases : a «never ending story» // *Restor. Neurol. Neurosci.* 2010. Vol. 28, № 3. P. 349–366.
26. Mäkelä J.P., Forss N., Jääskeläinen J. et al. Magnetoencephalography in neurosurgery // *Neurosurgery.* 2007. Vol. 61, suppl. 1. P. 147–165.
27. Malcolm M.P., Triggs W.J., Light K.E. et al. Reliability of motor cortex transcranial magnetic stimulation in four muscle representations // *Clin. Neurophysiol.* 2006. Vol. 117, № 3. P. 1037–1046.
28. Nagarajan S., Kirsch H., Lin P. et al. Preoperative localization of hand motor cortex by adaptive spatial filtering of magnetoencephalography data // *J. Neurosurg.* 2008. Vol. 109, № 2. P. 228–237.
29. Nimsy C., Ganslandt O., Hastreiter P. et al. Preoperative and intraoperative diffusion tensor imaging-based fiber tracking in glioma surgery // *Neurosurgery.* 2007. Vol. 61, suppl. 1. P. 178–186.
30. 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 : Clinical article // *J. Neurosurg.* 2011. Vol. 114, № 3. P. 738–746.
31. 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. Vol. 70, № 2. P. 283–294.
32. Ostrý S., Belšan T., Otáhal J. et al. Is intraoperative diffusion tensor imaging at 3.0 T comparable to subcortical corticospinal tract mapping? // *Neurosurgery.* 2013. Vol. 73, № 5. P. 797–807.
33. Ottenhausen M., Krieg S.M., Meyer D., Ringel F. Functional preoperative and intraoperative mapping and monitoring : increasing safety and efficacy in glioma surgery // *Neurosurf. Focus.* 2015. Vol. 38, № 1. P. E3.
34. Picht T., Schulz J., Hanna M. et al. Assessment of the influence of navigated transcranial magnetic stimulation on surgical planning for tumors in or near the motor cortex // *Neurosurgery.* 2012. Vol. 70, № 5. P. 1248–1257.
35. Piquer J., Llácer J.L., Rovira V. et al. Fluorescence-guided surgery and biopsy in gliomas with an exoscope system // *Biomed. Res. Int.* 2014. Vol. 2014. Article ID 207974. P. 6.
36. 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. Vol. 114, № 3. P. 719–726.
37. Rossi S., Hallett M., Rossini P.M., Pascual-Leone A. Safety, ethical considerations, and application guidelines for the use of transcranial magnetic stimulation in clinical practice and research // *Clin. Neurophysiol.* 2009. Vol. 120, № 12. P. 2008–2039.
38. Rossini P.M., Rossi S. Transcranial magnetic stimulation : diagnostic, therapeutic, and research potential // *Neurology.* 2007. Vol. 68, № 7. P. 484–488.
39. Sana'i N., Berger V. Glioma extent of resection and its impact on patient outcome // *Neurosurgery.* 2008. Vol. 62. P. 753–766.
40. Santiago-Rodriguez E., Cardenas-Morales L., Harmony T. et al. Repetitive transcranial magnetic stimulation decreases the number of seizures in patients with focal neocortical epilepsy // *Seizure.* 2008. Vol. 17, № 8. P. 677–683.
41. Schrader L.M., Stern J.M., Koski L. et al. Seizure incidence during single — and paired-pulse transcranial magnetic stimulation (TMS) in individuals with epilepsy // *Clin. Neurophysiol.* 2004. Vol. 115, № 12. P. 2728–2737.
42. 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. Vol. 118, № 2. P. 287–296.
43. Suess O., Suess S., Brock M., Kombos T. Intraoperative electrocortical stimulation of Brodmann area 4: a 10-year analysis of 255 cases // *Head Face Med.* 2006. Vol. 2. P. 20.
44. Takahashi S., Vajkoczy P., Picht T. Navigated transcranial magnetic stimulation for mapping the motor cortex in patients with rolandic brain tumors // *Neurosurg. Focus.* 2013. Vol. 34, № 4. P. E3.
45. Tarapore P.E., Tate M.C., Findlay A.M. et al. Preoperative multimodal motor mapping : a comparison of magnetoencephalography

- imaging, navigated transcranial magnetic stimulation, and direct cortical stimulation // *J. Neurosurg.* 2012. Vol. 117. P. 354–362.
46. Тус F., Boyadjian A. Plasticity of motor cortex induced by coordination and training // *Clin. Neurophysiol.* 2011. Vol. 122, № 1. P. 153–162.
47. Ulmer J.L., Hacein-Bey L., Mathews V.P. et al. Lesion-induced pseudodominance at functional magnetic resonance imaging : implications for preoperative assessments // *Neurosurgery.* 2004. Vol. 55, № 3. P. 569–581.
48. Wu J.S., Zhou L.F., Tang W.J. et al. Clinical evaluation and follow-up outcome of diffusion tensor imaging-based functional neuronavigation : a prospective, controlled study in patients with gliomas involving pyramidal tracts // *Neurosurgery.* 2007. Vol. 61. P. 935–949.
49. Yamada S., Muragaki Y., Maruyama T. et al. Role of neurochemical navigation with 5-aminolevulinic acid during intraoperative MRI-guided resection of intracranial malignant gliomas // *Clin. Neurol. Neurosurg.* 2015. Vol. 130. P. 134–139.
50. 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. Vol. 71, № 6. P. 1170–1184.

Поступила в редакцию 14.12.2016 г.

Сведения об авторах:

Щербук Александр Юрьевич (e-mail: endos@rambler.ru), д-р мед. наук, доц., проф. каф. нейрохир. и неврол., зав. нейрохир. (онкол.) отд.;
Ерошенко Максим Евгеньевич (e-mail: max912@mail.ru), канд. мед. наук, ассистент той же каф., нейрохир. нейрохир. (онкол.) отд.;
Санкт-Петербургский клинический научно-практический центр специализированных видов медицинской помощи (онкологический),
197758, Санкт-Петербург, пос. Песочный, Ленинградская ул, 68А, лит. А;

Щербук Юрий Александрович (e-mail: 9361661@gmail.com), акад. РАН, д-р мед. наук, проф., зав. каф. нейрохир. и неврол.;
кафедра нейрохирургии и неврологии, медицинский факультет, Санкт-Петербургский государственный университет,
199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7–9.