

## Применение транскраниальной магнитной стимуляции в нейрохирургии

А.Ю. Дмитриев<sup>1,2</sup> ✉, В.Г. Дашьян<sup>1,2</sup>

Нейрохирургическое отделение для лечения больных с сосудистыми заболеваниями головного мозга

<sup>1</sup> ГБУЗ «Научно-исследовательский институт скорой помощи им. Н.В. Склифосовского ДЗМ»

Российская Федерация, 129090, Москва, Большая Сухаревская пл., д. 3

<sup>2</sup> ФГБОУ ВО «Московский государственный медико-стоматологический университет им. А.И. Евдокимова» МЗ РФ

Российская Федерация, 127473, Москва, ул. Делегатская, д. 20, стр. 1

✉ Контактная информация: Дмитриев Александр Юрьевич, кандидат медицинских наук, врач-нейрохирург, нейрохирургическое отделение для лечения больных с сосудистыми заболеваниями головного мозга ГБУЗ «НИИ СП им. Н.В. Склифосовского ДЗМ». Email: [dmitriev@neurosklif.ru](mailto:dmitriev@neurosklif.ru)

### РЕЗЮМЕ

Транскраниальная магнитная стимуляция (ТМС) является относительно новым диагностическим и лечебным методом. Ее широкое внедрение в нейрохирургическую практику началось с 2009 года. Метод применяют для неинвазивного обнаружения функционально значимых центров головного мозга. Сочетание с трактографией облегчает построение проводящих путей. В обзоре обобщены основные результаты применения ТМС при планировании нейрохирургических вмешательств. Рассмотрены принцип метода, его преимущества и недостатки, приведено сравнение с результатами прямой корковой стимуляции, являющейся «золотым стандартом» при обнаружении функционально значимых центров головного мозга.

### Ключевые слова:

транскраниальная магнитная стимуляция, ТМС, функционально значимые центры головного мозга, предоперационное планирование, нейронавигация

### Ссылка для цитирования

Дмитриев А.Ю., Дашьян В.Г. Применение транскраниальной магнитной стимуляции в нейрохирургии. *Журнал им. Н.В. Склифосовского неотложная медицинская помощь*. 2022;11(1):96–103. <https://doi.org/10.23934/2223-9022-2022-11-1-96-103>

### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

### Благодарность, финансирование

Исследование не имеет спонсорской поддержки

МРТ — магнитно-резонансная томография  
МЭГ — магнитоэнцефалография  
ПЭТ — позитронно-эмиссионная томография

ТМС — транскраниальная магнитная стимуляция  
фМРТ — функциональная магнитно-резонансная томография

### ВВЕДЕНИЕ

Первое описание транскраниальной магнитной стимуляции (ТМС) принадлежит *Barker A.T.* (1985) [1]. Последующее развитие безрамного стереотаксиса расширило ее возможности. Выполняя магнитную стимуляцию под контролем нейронавигации и совмещая полученные результаты («горячие точки») с магнитно-резонансной томографией (МРТ), оператор получил возможность неинвазивно определять расположение функционально значимых центров головного мозга. *Picht T. et al.* в 2009 году первыми применили новый метод для планирования нейрохирургического вмешательства [2].

ТМС — не единственный способ локации корковых функциональных структур, применяемый в нейрохирургии перед операцией. Для этих целей также используют функциональную МРТ (фМРТ), магнитоэнцефалографию (МЭГ) и позитронно-эмиссионную томографию (ПЭТ). Для обнаружения мозговых центров при фМРТ оценивают динамику кровотока, при МЭГ регистрируют изменения магнитных полей, а при ПЭТ — повышение потребления глюкозы и гиперперфузию в ответ на выполнение заданий [3]. В основу

ТМС положена локальная активация или угнетение центров мозга при воздействии на них магнитного поля, что делает этот метод наиболее схожим с интраоперационной нейростимуляцией [3]. Несмотря на это, ТМС нечасто применяют для предоперационного планирования, что связано с высокой стоимостью оборудования. Большинство работ представлено авторами из одних и тех же крупных клиник Германии, Италии, Японии и США. Данный обзор обобщает их основные результаты.

### ПРИНЦИП МЕТОДА

Принцип ТМС похож на метод корковой стимуляции. Исследование вызывает стимуляцию или ингибирование нейрональной активности за счет подведения магнитного поля к скальпу. За основу был взят метод транскраниальной электростимуляции, но при его применении токи распространялись хаотично в разные стороны. При ТМС ток катушки создает магнитное поле, изменение которого наводит ток лишь в нужных участках головного мозга [3].

Вызванные стимуляцией токи в коре вызывают повторяющуюся деполяризацию аксонов, приводящую к стимуляции или нарушению функции нужного коркового центра. При локации первичного моторного центра наблюдают произвольные мышечные сокращения или развитие преходящего пареза. При стимуляции речевой зоны нарушается речь [4, 5].

К стимулирующей катушке индуктивности крепятся навигационные датчики, отслеживающие ее положение в пространстве. Полученные координаты накладываются на анатомические данные МРТ, формируя расположение функционально значимой зоны [2].

На точность метода влияют тип катушки, ее положение в пространстве, прием лекарственных препаратов, уменьшающих возбудимость коры мозга и возраст пациента. В более старшем возрасте данные подержаны большей изменчивости, что может происходить из-за одновременного возбуждения меньшего количества спинальных мотонейронов или их менее синхронной активации. Несмотря на это, метод ТМС имеет хорошую воспроизводимость, так как различия результатов между исследованиями не превышают 5–6 мм. Данная дистанция незначительна, учитывая тот факт, что площадь функционально значимой зоны при ТМС всегда превышает ее действительный размер [6].

Перед стимуляцией двигательной зоны определяют моторный порог. Для этого выявляют самую возбудимую область коры, то есть ту, при раздражении которой регистрируют самый сильный ответ в короткой приводящей мышце первого пальца кисти. Далее в этой зоне понижают силу тока до тех пор, пока ответ при миографии с напряжением тока более 50 мкВ не будет зарегистрирован в 5 стимуляциях из 10 [4].

При выполнении ТМС катушку аппарата ориентируют параллельно ходу нейронов (при локации двигательного центра — перпендикулярно прецентральной извилине), так как в этом случае наводят больший ток [7].

Полученные при ТМС данные совмещают с анатомической МРТ и загружают в навигационную систему. При планировании трактографии «горячие точки», выявленные при магнитной стимуляции, являются ориентирами для построения проводящих путей. Интеграция получаемых данных в единую больничную сеть ускоряет рабочий процесс [8].

Обычно ТМС применяют для выявления центров движения конечностей. Но этот метод можно использовать и для локации центров, отвечающих за движение лицевой мускулатуры. Это делает его уникальным, так как центр лицевой мускулатуры нельзя обнаружить при фМРТ из-за сложности парадигм. Локация центров иннервации лицевой мускулатуры является более сложной задачей. Лицевые мышцы имеют меньший размер, и поэтому для них нужны более тонкие электроды. Амплитуда ответа с мышц более низкая, а форма более сложная, чем от конечностей. Для выявления таких центров требуется более высокий двигательный порог (*motor threshold*), в пределах 105–110%. Чаще лицевые мышцы имеют контралатеральную иннервацию, но в 20% возможна ипсилатеральная. Проще всего лоцировать круговую мышцу рта, сложнее подбородочную (из-за более центральной локализации и пересечения мышечных волокон), еще сложнее — мышцы верхней части лица (лобную, круговую мышцу глаза). Центр произвольных движений лицевой мускулатуры обычно расположен в области

прецентральной извилины на границе между средней и нижней третями. Но в 25% случаев возможно его смещение кпереди или кзади [9].

#### ПРЕИМУЩЕСТВА ТРАНСКРАНИАЛЬНОЙ МАГНИТНОЙ СТИМУЛЯЦИИ И ЕЕ КЛИНИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ

Транскраниальная магнитная стимуляция является единственным неинвазивным способом диагностики функционально значимых корковых центров, принцип которого схож с прямой электростимуляцией [10].

Применение ТМС позволяет более точно планировать хирургический доступ и облегчает обнаружение функционального центра мозга, что ускоряет последующую нейростимуляцию [11–13]. В хирургии злокачественных глиом в сочетании с флуоресценцией это приводит к снижению частоты стойких двигательных нарушений с 29 до 10% и повышению доли радикальных резекций с 51 до 73% [14].

По данным *Picht T. et al.* при анализе результатов резекции 70 опухолей выполнение ТМС в 55% повлияло на тактику хирургического лечения: в 16% изменили хирургический доступ, в 8% — объем резекции опухоли (как в большую, так и в меньшую сторону), а в 3% — тактику лечения [15]. Знание о точном расположении двигательного и речевого центров, выявленных при ТМС, и отсутствие «горячих точек» в проекции хирургического доступа позволяют минимизировать краниотомию [10, 16, 17].

ТМС является наиболее точным предоперационным методом обнаружения двигательной зоны. В исследованиях по сравнению с прямой корковой стимуляцией, являющейся «золотым стандартом», он оказался точнее, чем фМРТ и МЭГ [11, 18, 19]. Во-первых, это связано с идентичностью базовых принципов, лежащих в основе методов ТМС и электростимуляции, основанных на инактивации нейронов вследствие их деполяризации [3, 5, 20]. Во-вторых, на точность ТМС менее влияют рядом расположенные опухоли и сосудистые мальформации, чем на точность фМРТ [21, 22]. В-третьих, при выполнении ТМС не возникает артефактов от сочетанного движения других групп мышц, что характерно для фМРТ (синергичные движения в конечностях, движения головы) [7].

Метод позволяет отличать функционально необходимые участки мозга от необязательных, которые вовлечены в выполнение функции, но резекция которых не приводит к неврологическим нарушениям [23].

В отличие от фМРТ ТМС можно применять у больных с мнестико-интеллектуальными нарушениями, не выполняющих команды [20], и при клаустрофобии [7]. ТМС может быть информативной для обнаружения первичного двигательного центра при наличии глубокого пареза и плегии, что невозможно при фМРТ. При сдавлении моторной зоны происходит снижение амплитуды ответов, но их регистрация возможна. Полное исчезновение происходит лишь при разрушении корковых центров или субкортикальных проводящих путей [24].

ТМС имеет высокую отрицательную прогностическую ценность. Это означает, что если при ТМС определенная часть мозга функционально незначима, то ее резекция вероятнее всего не приведет к неврологическим нарушениям. Это важно учитывать при невозможности выполнения нейромониторинга, что позволяет проводить более радикальную операцию [13].

Применение ТМС дает возможность увеличить полноту удаления опухоли, улучшает функциональный исход и снижает вероятность судорог у больных с эпилепсией. Особенно необходимо применение метода при выполнении супратотальной резекции новообразований [12, 17].

В хирургии опухолей двигательной зоны с использованием ТМС радикальной резекции удается достичь в 68% при развитии стойких парезов у 8% больных [25]. Метод корковой и подкорковой стимуляции является необходимым при удалении таких опухолей. Но дополнительное применение ТМС и трактографии позволяют еще более улучшить функциональные исходы. Во-первых, их применение дает возможность на предоперационном этапе более точно планировать объем резекции опухоли. Применение ТМС изменяет предполагаемый объем операции у 14%, а ее комбинация с трактографией — у 20% больных [26]. Во-вторых, визуальное представление расположения двигательной зоны и пирамидного пути облегчает подкорковую стимуляцию. Положительный ответ при корковой и подкорковой стимуляции говорит хирургу лишь о том, что корковый центр или проводящий путь находится на определенном расстоянии от точки стимуляции. Это расстояние зависит от силы тока, обычно 1 мА соответствует 1 мм. Но метод нейрофизиологии не указывает, в каком направлении расположены подкорковые проводящие пути. При совмещении нейронавигации с результатами ТМС хирург их видит. Это позволяет выполнять более тщательное корковое и подкорковое картирование (меньшее расстояние между точками) именно в направлении предполагаемого проводящего пути [23, 26]. По данным *Raffa G. et al.* (2018), при изолированном применении нейромониторинга при удалении опухолей первичной двигательной зоны двигательные нарушения после операции возникают в 57%, а стойкие — в 26%. При комбинации корковой стимуляции и ТМС их частота снижается до 31% и 17%, а при сочетании электрокартирования, ТМС и трактографии — до 11% и 3% соответственно [26].

При глиомах речевых зон комбинация ТМС и нейростимуляции дает возможность проведения радикальной резекции опухоли в 72–73%, при этом частота стойких речевых нарушений составляет лишь 6–8%. Хорошие результаты таких операций создают предпосылки для хирургического лечения глиом вербальных центров под наркозом на основании лишь данных ТМС и трактографии при невозможности хирургии в сознании [25, 27]. Одну из первых таких работ выполнили *Hendrix P. et al.* (2017). Опирируя под наркозом глиомы речевых зон с применением ТМС, авторы наблюдали более раннее восстановление (в первые 3 месяца) речи, а операция и госпитализация были короче, чем без использования магнитной стимуляции. Однако количество стойких вербальных нарушений снизить не удалось. Радикальность резекций также не различалась, хотя и соответствовала таковой при хирургии в сознании (65%) [28]. По данным *Щербука А.Ю.* и соавт. (2015), применение ТМС уменьшает количество очаговых неврологических нарушений после операции с 38 до 10% (в 3,8 раза) [4].

ТМС используют для оценки высших корковых функций. *Ille S. et al.* (2018) с ее помощью определяли расположение корковых центров арифметических вычислений при опухолях теменной доли. Несмотря на отсутствие сравнения с результатами прямой электро-

стимуляции, авторы подтвердили точность предоперационного картирования клиническими данными: при резекции вычислительного центра чаще наблюдали нарушение арифметического счета после операции. Чувствительность и отрицательная прогностическая значимость ТМС составила 1,0, положительная прогностическая значимость — 0,8, а специфичность — 0,5 [29].

ТМС облегчает построение проводящих путей головного мозга при трактографии [30], позволяет разграничить подкорковые тракты для лица, руки и ноги [26] и отобразить лишь функционально значимые волокна [31].

ТМС используют для прогнозирования послеоперационных функциональных исходов при опухолях значимых зон. Также с ее помощью оценивают необходимость применения интраоперационного нейромониторинга. При глиомах, расположенных около прецентральной извилины, факторами риска плохого прогноза являются инфильтрация опухолью М1-коры, асимметрия межполушарной патологической возбудимости и расстояние от пирамидного пути до опухоли 8 мм и менее. Данную дистанцию рассчитывают при трактографии, основанной на данных ТМС. При наличии факторов риска послеоперационное восстановление двигательных неврологических нарушений происходит в 6 раз реже, а стойкие дисфункции развиваются чаще. Указанные параметры являются показанием для применения интраоперационного нейромониторинга [32]. При злокачественных глиомах пороговым расстоянием между пирамидным трактом и опухолью, дающим возможность исключить нарастание двигательных нарушений после операции, является 12 мм [33]. Сохранение моторных вызванных потенциалов при послеоперационной ТМС у больных с парезами, выполненной через неделю после резекции опухоли, является предиктором раннего восстановления мышечной силы [34].

При помощи ТМС оценивают пластичность мозга при опухолях. Метод позволяет выявить направление и рассчитать расстояние смещения значимых корковых зон. Эти знания дают возможность оценить точное взаиморасположение объемного образования и функциональных центров мозга, определить операбельность опухоли и уточнить объем ее резекции [35]. Знание о дислокации функционально значимых центров позволяет более точно оценить объем резекции опухоли при ее продолженном росте [20, 36].

В хирургии артериовенозных мальформаций ТМС, как и фМРТ, дает возможность перед операцией оценить истинное расположение функционально значимой зоны, что у некоторых больных изменяет риск резекции по шкале *Spetzler–Martin* и тактику лечения [37]. *Germano A. et al.* (2019) применили такой подход для классификации и определения показаний к операции у 10 больных с артериовенозной мальформацией. ТМС изменила градацию мальформаций по шкале *Spetzler–Martin* в 6 наблюдениях. Правильность метода авторы оценили по исходам заболевания, не получив ни единого ухудшения состояния после операции [38].

ТМС обладает высокой индивидуальной и групповой воспроизводимостью, средняя погрешность составляет 5,7 мм [39]. Воспроизводимость при ТМС выше, чем при фМРТ [7].

*Butenshon V.M. et al.* (2018) оценили экономическую рентабельность применения ТМС. Несмотря на

дополнительные расходы (842 евро), общая стоимость лечения при использовании данного метода снижается за счет уменьшения продолжительности госпитализации. При добавлении к этому непрямым расходам (реабилитация, психотерапия, потеря трудоспособности и повторная химиотерапия) различия еще более возрастают. Это делает применение ТМС рентабельным и необходимым при глиомах функционально значимых зон головного мозга [40].

### НЕДОСТАТКИ

Несмотря на принципиальную схожесть ТМС и корковой стимуляции, эти два метода имеют и различия. Вызванные при ТМС и корковой стимуляции токи различаются по плотности и направлению. При корковой стимуляции биполярным пинцетом наведенные микротоки протекают только между его браншами и напрямую активируют корковые нейроны. При ТМС активация нейронов происходит не напрямую, а через проводящие пути, из-за чего возможна активация большего количества нервных клеток [41]. Обходная активация или ингибирование корковых проводящих путей может дать ложно положительный ответ при ТМС в тех местах, которые напрямую не участвуют в речевом или двигательном процессе. Резекция таких участков мозга обычно не приводит к стойким неврологическим нарушениям [5]. Но их сохранение снижает радикальность операции. Поэтому совместное применение ТМС и фМРТ, обладающей большей специфичностью при предоперационном планировании, позволяет уточнить локацию функционально значимых речевых зон [13, 42].

Другой причиной различий данных между ТМС и корковой стимуляцией могут быть различия в выполняемых больными заданиях, разное время исследования и большее внимание наблюдателя при проведении магнитной стимуляции. Запись ТМС ведется не в операционной, а в спокойной плановой обстановке, в связи с чем исследователь не ограничен временем, имея возможность выполнить обследование более тщательно [5].

Проведение ТМС часто ограничивается локацией лишь первичной моторной коры. Обнаружение дополнительной двигательной зоны и премоторной коры затруднено. Это требует большей интенсивности стимулирующих импульсов. Но и в этом случае бывает сложно отличить их друг от друга, так как данные отделы соединены между собой синапсами. Активация непервичной моторной коры часто приводит к последующему возбуждению первичной, из-за чего стирается грань между ними [43].

Сдавление или разрушение опухолью пирамидных клеток приводит к тому, что стимуляция при ТМС уже не может вызвать потенциалы действия у достаточного количества нейронов для получения мышечного ответа. Этот же недостаток характерен и для прямой корковой стимуляции, что приводит к ложно отрицательным результатам картирования [18].

Выполнение ТМС — длительный процесс, занимает 1 час, и еще 30 минут требует последующая обработка данных [7]. Интраоперационное смещение мозга является главным фактором неточности метода [44].

### СРАВНЕНИЕ ТРАНСКРАНИАЛЬНОЙ МАГНИТНОЙ СТИМУЛЯЦИИ С КОРКОВОЙ СТИМУЛЯЦИЕЙ

Транскраниальная магнитная стимуляция обладает высокой точностью в обнаружении первичного двигательного центра. При сравнении с результатами прямой корковой стимуляции среднее различие составляет 3,5–10 мм, что находится в пределах точности регистрации аппарата и не превышает 1 см. Магнитная стимуляция точнее, чем фМРТ, при которой средняя погрешность составляет 15 мм [2, 7, 10, 11, 16, 18, 44].

Безошибочность ТМС зависит от количества точек при корковой стимуляции: чем больше — тем выше. Это происходит из-за того, что место нейростимуляции представляет собой не физическую точку, а площадь. Кроме того, при более тщательном исследовании повышается вероятность нахождения точек ближе к значимой зоне при ТМС. При скрупулезном картировании коры и отсутствии смещения мозга разница между результатами ТМС и кортикостимуляции уменьшается до 2 мм, что сопоставимо с ошибкой регистрации навигационной системы [44].

Помимо точности ТМС и корковая стимуляция обладают полным соответствием. ТМС выявляет двигательную зону во всех случаях, если она бывает обнаружена при кортикостимуляции. И наоборот, если моторный центр не обнаружен при ТМС, его не находят и при электрокартировании [18].

Точность ТМС в обнаружении первичной двигательной зоны составляет 100%, специфичность — 80%, положительная прогностическая ценность — 90%, отрицательная — 100% [14]. При выявлении центров речи чувствительность метода варьирует в пределах 63–90%, специфичность — 24–67%, положительная прогностическая значимость — 36–55%, отрицательная — 74–84% [5, 16]. При изолированном обнаружении центра Брока чувствительность ТМС составляет 100%, специфичность 13%, ее положительная прогностическая ценность — 57%, а отрицательная — 100%. Из-за высокой точности магнитной стимуляции в выявлении участков мозга, не вовлеченных в речевой процесс, этого метода достаточно для планирования трепанации и кортикотомии. Но из-за низкой специфичности ТМС ее данные требуют верификации при корковой стимуляции [5].

Сравнивая данные ТМС с результатами нейростимуляции, следует понимать, что методы нейромониторинга тоже могут давать погрешность в пределах 10 мм. К этому нужно добавить неточность регистрации навигации около 2 мм. Смещение мозга может значительно превышать эти показатели. Поэтому для минимизации церебральной дислокации сравнивать методы следует сразу после вскрытия твердой мозговой оболочки [7].

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Высокая стоимость оборудования ограничивает широкое применение транскраниальной магнитной стимуляции. Лишь единичные работы содержат более 100 наблюдений. Согласно этим данным, транскраниальная магнитная стимуляция является высокоинформативным методом для обнаружения функционально

значимых мозговых структур. Данный способ позволяет лоцировать корковые центры и в комбинации с трактографией облегчает построение модели проводящих путей.

Метод наиболее точен при выявлении первичной двигательной зоны, превышая достоверность функциональной магнитно-резонансной томографии и магнитоэнцефалографии. Но обнаружение речевых центров этим методом менее безошибочно из-за вариабельности их расположения.

Транскраниальная магнитная стимуляция является важным дополнением к инвазивной нейростимуля-

ции. Обладая высокой чувствительностью, она отлично подходит для планирования краниотомии, но из-за низкой специфичности требует подтверждения при нейробиологическом картировании или функциональной магнитно-резонансной томографии.

Более широкое внедрение транскраниальной магнитной стимуляции в диагностический арсенал нейрохирурга является предпосылкой для повышения радикальности операций и улучшения функциональных исходов. Для подтверждения этих выводов необходимы крупные мультицентровые исследования.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- Barker AT, Jalinous R, Freeston IL. Non-invasive magnetic stimulation of human motor cortex. *Lancet*. 1985;1(8437):1106–1107. PMID: 2860322 [https://doi.org/10.1016/s0140-6736\(85\)92413-4](https://doi.org/10.1016/s0140-6736(85)92413-4)
- Picht T, Mularski S, Kuehn B, Vajkoczy P, Kombos T, Suess O. Navigated transcranial magnetic stimulation for preoperative functional diagnostics in brain tumor surgery. *Neurosurgery*. 2009;65(6suppl):93–99. PMID: 19935007 <https://doi.org/10.1227/01.NEU.0000348009.22750.59>
- Tharin S, Golby A. Functional brain mapping and its applications to neurosurgery. *Neurosurgery*. 2007;60(4 Suppl 2):185–202. PMID: 17415154 <https://doi.org/10.1227/01.NEU.0000255386.95464.52>
- Шербук А.Ю., Шербук Ю.А., Ерошенко М.Е. Технические аспекты картирования моторной зоны коры путем навигационной транскраниальной магнитной стимуляции у больных с опухолями головного мозга. *Российский нейрохирургический журнал им. А.Л. Поленова*. 2015;7(4):26–32.
- Picht T, Krieg SM, Sollmann N, Rösler J, Niraula B, Neuvonen T, et al. A comparison of language mapping by preoperative navigated transcranial magnetic stimulation and direct cortical stimulation during awake surgery. *Neurosurgery*. 2013;72(5):808–819. PMID: 23385773 <https://doi.org/10.1227/NEU.0b013e3182889e01>
- Forster MT, Limbart M, Seifert V, Senft C. Test-retest reliability of navigated transcranial magnetic stimulation of the motor cortex. *Neurosurgery*. 2014;10(Suppl 1):51–56. PMID: 23842557 <https://doi.org/10.1227/NEU.0000000000000075>
- Forster MT, Hattingen E, Senft C, Gasser T, Seifert V, Szelenyi A. Navigated transcranial magnetic stimulation and functional magnetic resonance imaging: advanced adjuncts in preoperative planning for central region tumors. *Neurosurgery*. 2011;68(5):1317–1325. PMID: 21273929 <https://doi.org/10.1227/NEU.0b013e31820b528c>
- Sollmann N, Meyer B, Krieg SM. Implementing functional preoperative mapping in the clinical routine of a neurosurgical department: technical note. *World Neurosurg*. 2017;103:94–105. PMID: 28377253 <https://doi.org/10.1016/j.wneu.2017.03.114>
- Saisanen L, Julkunen P, Kempainen S, Danner N, Immonen A, Mervaala E, et al. Locating and outlining the cortical motor representation areas of facial muscles with navigated transcranial magnetic stimulation. *Neurosurgery*. 2015;77(3):394–495. PMID: 26035404 <https://doi.org/10.1227/NEU.0000000000000798>
- Takahashi S, Vajkoczy P, Picht T. Navigated transcranial magnetic stimulation for mapping the motor cortex in patients with rolandic brain tumors. *Neurosurg Focus*. 2013;34(4):E3. PMID: 23544409 <https://doi.org/10.1227/10.3171/2013.1.FOCUS133>
- Krieg SM, Shibani E, Buchmann N, Gempt J, Foerschler A, Meyer B, et al. Utility of presurgical navigated transcranial magnetic brain stimulation for the resection of tumors in eloquent motor areas. *J Neurosurg*. 2012;116(5):994–1001. PMID: 22304452 <https://doi.org/10.3171/2011.12.JNS111524>
- Picht T, Schulz J, Vajkoczy P. The preoperative use of navigated transcranial magnetic stimulation facilitates early resection of suspected low-grade gliomas in the motor cortex. *Acta Neurochir*. 2013;155(10):1813–1821. PMID: 23996233 <https://doi.org/10.1007/s00701-013-1839-1>
- Ille S, Sollmann N, Butenschoen VM, Meyer B, Ringe F, Krieg SM. Resection of highly language-eloquent brain lesions based purely on rTMS language mapping without awake surgery. *Acta Neurochir (Wien)*. 2016;158(12):2265–2275. PMID: 27688208 <https://doi.org/10.1007/s00701-016-2968-0>
- Raffa G, Scibilia A, Conti A, Cardali SM, Rizzo V, Terranova C, et al. Multimodal surgical treatment of high-grade gliomas in the motor area: the impact of the combination of navigated transcranial magnetic stimulation and fluorescein-guided resection. *World Neurosurg*. 2019;128:e378–e390. PMID: 31029822 <https://doi.org/10.1016/j.wneu.2019.04.158>
- Picht T, Schulz J, Hanna M, Schmidt S, Suess O, Vajkoczy P. Assessment of the influence of navigated transcranial magnetic stimulation on surgical planning for tumors in or near the motor cortex. *Neurosurgery*. 2012;70(5):1248–1257. PMID: 22127045 <https://doi.org/10.1227/NEU.0b013e318243881e>
- Jung J, Lavrador JP, Patel S, Giamouriadis A, Lam J, Bhangoo R, et al. First United Kingdom experience of navigated transcranial magnetic stimulation in preoperative mapping of brain tumors. *World Neurosurg*. 2019; 122:e1578–e1587. PMID: 30476661 <https://doi.org/10.1016/j.wneu.2018.11.114>
- Raffa G, Scibilia A, Conti A, Ricciardo G, Rizzo V, Morelli A, et al. The role of navigated transcranial magnetic stimulation for surgery of motor-eloquent brain tumors: a systematic review and meta-analysis. *Clin Neurol Neurosurg*. 2019;180:7–17. PMID: 30870762 <https://doi.org/10.1016/j.clineuro.2019.03.003>
- Tarapore PE, Tate MC, Findlay AM, Honma SM, Mizuiru D, Berger MS, Nagarajan SS. Preoperative multimodal motor mapping: a comparison of magnetoencephalography imaging, navigated transcranial magnetic stimulation, and direct cortical stimulation. *J Neurosurg*. 2012;117(2):354–362. PMID: 22702484 <https://doi.org/10.3171/2012.5.JNS12124>
- Sollmann N, Picht T, Makela JP, Meyer B, Ringel F, Krieg SM. Navigated transcranial magnetic stimulation for preoperative language mapping in a patient with a left frontoopercular glioblastoma. *J Neurosurg*. 2013;118(1):175–179. PMID: 23101450 <https://doi.org/10.3171/2012.9.JNS121053>
- Takahashi S, Jussen D, Vajkoczy P, Picht T. Plastic relocation of motor cortex in a patient with LGG (low grade glioma) confirmed by NBS (navigated brain stimulation). *Acta Neurochir (Wien)*. 2012;154(11):2003–2008. PMID: 22945898 <https://doi.org/10.1007/s00701-012-1492-0>
- Ille S, Sollmann N, Hauck T, Maurer S, Tanigawa N, Obermueller T, et al. Impairment of preoperative language mapping by lesion location: a functional magnetic resonance imaging, navigated transcranial magnetic stimulation, and direct cortical stimulation study. *J Neurosurg*. 2015;123(2):314–324. PMID: 25884257 <https://doi.org/10.3171/2014.10.JNS141582>
- Kato N, Schilt S, Schneider H, Frey D, Kufeld M, Vajkoczy P, et al. Functional brain mapping of patients with arteriovenous malformations using navigated transcranial magnetic stimulation: first experience in ten patients. *Acta Neurochir (Wien)*. 2014;156(5):885–895. PMID: 24639144 <https://doi.org/10.1007/s00701-014-2043-7>
- Ottenhausen M, Krieg SM, Meyer B, Ringel F. Functional preoperative and intraoperative mapping and monitoring: increasing safety and efficacy in glioma surgery. *Neurosurg Focus*. 2015;38(1):E3. PMID: 25552283 <https://doi.org/10.3171/2014.10.FOCUS14611>
- Picht T, Schmidt S, Woitzik J, Suess O. Navigated brain stimulation for preoperative cortical mapping in paretic patients: case report of a hemiplegic patient. *Neurosurgery*. 2011;68(5):E1475–E1480. PMID: 21307789 <https://doi.org/10.1227/NEU.0b013e318210c7df>
- Raffa G, Quattropiani MC, Germano A. When imaging meets neurophysiology: the value of navigated transcranial magnetic stimulation for preoperative neurophysiological mapping prior to brain tumor surgery. *Neurosurg Focus*. 2019; 47(6):E10. PMID: 31786549 <https://doi.org/10.3171/2019.9.FOCUS19640>
- Raffa G, Conti A, Scibilia A, Cardali SM, Esposito F, Angileri FF, et al. The impact of diffusion tensor imaging fiber tracking of the corticospinal tract based on navigated transcranial magnetic stimulation on surgery of motor-eloquent brain lesions. *Neurosurgery*. 2018;83(4):768–782. PMID: 29211865 <https://doi.org/10.1093/neuros/nyx554>
- Sollmann N, Kelm A, Ille S, Schroder A, Zimmer C, Ringel F, et al. Setup presentation and clinical outcome analysis of treating highly language-eloquent gliomas via preoperative navigated transcranial magnetic stimulation and tractography. *Neurosurg Focus*. 2018;44(6):E2. PMID: 29852769 <https://doi.org/10.3171/2018.3.FOCUS1838>
- Hendrix P, Senger S, Simgen A, Griessenauer CJ, Oertel J. Preoperative rTMS language mapping in speech-eloquent brain lesions resected under general anesthesia: a pair-matched cohort study. *World Neurosurg*. 2017;100:425–433. PMID: 28109861 <https://doi.org/10.1016/j.wneu.2017.01.041>
- Ille S, Drummer K, Giglhuber K, Conway N, Maurer S, Meyer B, et al. Mapping of arithmetic processing by navigated repetitive transcranial magnetic stimulation in patients with parietal brain

- tumors and correlation with postoperative outcome. *World Neurosurg.* 2018;114:e1016–e1030. PMID: 29597021 <https://doi.org/10.1016/j.wneu.2018.03.136>
30. Forster MT, Hoecker AC, Kang JS, Quick J, Seifert V, Hattingen E, et al. Does navigated transcranial stimulation increase the accuracy of tractography? A prospective clinical trial based on intraoperative motor evoked potential monitoring during deep brain stimulation. *Neurosurgery.* 2015;76(6):766–776. PMID: 25988930 <https://doi.org/10.1227/NEU.0000000000000715>
  31. Krieg SM, Buchmann NH, Gempt J, Shiban E, Meyer B, Ringel F. Diffusion tensor imaging fiber tracking using navigated brain stimulation – a feasibility study. *Acta Neurochir (Wien).* 2012;154(3):555–563. PMID: 22270529 <https://doi.org/10.1007/s00701-011-1255-3>
  32. Rosenstock T, Grittner U, Acker G, Schwarzer V, Kulchyska N, Vajkoczy P, et al. Risk stratification in motor area-related glioma surgery based on navigated transcranial magnetic stimulation data. *J Neurosurg.* 2017;126(4):1227–1237. PMID: 27257834 <https://doi.org/10.3171/2016.4.JNS152896>
  33. Sollmann N, Wildschuetz N, Kelm A, Conway N, Moser T, Bulubas L, et al. Associations between clinical outcome and navigated transcranial magnetic stimulation characteristics in patients with motor-eloquent brain lesions: a combined navigated transcranial magnetic stimulation-diffusion tensor imaging fiber tracking approach. *J Neurosurg.* 2018;128(3):800–810. PMID: 28362239 <https://doi.org/10.3171/2016.11.JNS162322>
  34. Takakura T, Muragaki Y, Tamura M, Maruyama T, Nitta M, Niki C, et al. Navigated transcranial magnetic stimulation for glioma removal: prognostic value in motor function recovery from postsurgical neurological deficits. *J Neurosurg.* 2017;127(4):877–891. PMID: 28059664 <https://doi.org/10.3171/2016.8.JNS16442>
  35. Conway N, Wildschuetz N, Moser T, Bulubas L, Sollmann N, Tanigawa N, et al. Cortical plasticity of motor-eloquent areas measured by navigated transcranial magnetic stimulation in patients with glioma. *J Neurosurg.* 2017;127(5):981–991. PMID: 28106500 <https://doi.org/10.3171/2016.9.JNS161595>
  36. Forster MT, Senft C, Hattingen E, Lorei M, Seifert V, Szelenyi A. Motor cortex evaluation by nTMS after surgery of central region tumors: a feasibility study. *Acta Neurochir (Wien).* 2012;154(8):1351–1359. PMID: 22669201 <https://doi.org/10.1007/s00701-012-1403-4>
  37. Ille S, Picht T, Shiban E, Meyer B, Vajkoczy P, Krieg SM. The impact of nTMS mapping on treatment of brain AVMs. *Acta Neurochir (Wien).* 2018;160(3):567–578. PMID: 29368047 <https://doi.org/10.1007/s00701-018-3475-2>
  38. Germano A, Raffa G, Conti A, Fiore P, Cardali SM, Esposito F, et al. Modern treatment of brain arteriovenous malformations using preoperative planning based on navigated transcranial magnetic stimulation: a revisit of the concept of eloquence. *World Neurosurg.* 2019;131:371–384. PMID: 31247351 <https://doi.org/10.1016/j.wneu.2019.06.119>
  39. Zdunczyk A, Fleischmann R, Schulz J, Vajkoczy P, Picht T. The reliability of topographic measurements from navigated transcranial magnetic stimulation in healthy volunteers and tumor patients. *Acta Neurochir (Wien).* 2013;155(7):1309–1317. PMID: 23479092 <https://doi.org/10.1007/s00701-013-1665-5>
  40. Butenschon VM, Ille S, Sollmann N, Meyer B, Krieg SM. Cost-effectiveness of preoperative motor mapping with navigated transcranial magnetic brain stimulation in patients with high-grade glioma. *Neurosurg Focus.* 2018;44(6):E18. PMID: 29852777 <https://doi.org/10.3171/2018.3.FOCUS1830>
  41. Kombos T, Picht T, Derdipoulos A, Suess O. Impact of intraoperative neurophysiological monitoring on surgery of high-grade gliomas. *J Clin Neurophysiol.* 2009;26(6):422–425. PMID: 19952567 <https://doi.org/10.1097/WNP.0b013e3181c2c0dc>
  42. Ille S, Sollmann N, Hauck T, Maurer S, Tanigawa N, Obermueller T, et al. Combined noninvasive language mapping by navigated transcranial magnetic stimulation and functional MRI and its comparison with direct cortical stimulation. *J Neurosurg.* 2015;123(1):212–225. PMID: 25748306 <https://doi.org/10.3171/2014.9.JNS14929>
  43. Mirbagheri A, Schneider H, Zdunczyk A, Vajkoczy P, Picht T. NTMS mapping of non-primary motor areas in brain tumour patients and healthy volunteers. *Acta Neurochir (Wien).* 2020;162(2):407–416. PMID: 31768755 <https://doi.org/10.1007/s00701-019-04086-x>
  44. Picht T, Schmidt S, Brandt S, Frey D, Hannula H, Neuvonen T, et al. Preoperative functional mapping for rolandic brain tumor surgery: comparison of navigated transcranial magnetic stimulation to direct cortical stimulation. *Neurosurgery.* 2011;69(3):581–589. PMID: 21430587 <https://doi.org/10.1227/NEU.0b013e3182181b89>

## REFERENCES

1. Barker AT, Jalinous R, Freeston IL. Non-invasive magnetic stimulation of human motor cortex. *Lancet.* 1985;1(8437):1106–1107. PMID: 2860322 [https://doi.org/10.1016/s0140-6736\(85\)92413-4](https://doi.org/10.1016/s0140-6736(85)92413-4)
2. Picht T, Mularski S, Kuehn B, Vajkoczy P, Kombos T, Suess O. Navigated transcranial magnetic stimulation for preoperative functional diagnostics in brain tumor surgery. *Neurosurgery.* 2009;65(6 suppl):93–99. PMID: 19935007 <https://doi.org/10.1227/01.NEU.0000348009.22750.59>
3. Tharin S, Golby A. Functional brain mapping and its applications to neurosurgery. *Neurosurgery.* 2007;60(4 Suppl 2):185–202. PMID: 17415154 <https://doi.org/10.1227/01.NEU.0000255386.95464.52>
4. Scherbuk AY, Scherbuk YU, Eroshenko ME. Technical Aspects of Mapping of the Motor Cortex Using Navigated Transcranial Magnetic Stimulation in Patients with Brain Tumors. *Rossiyskiy neyrokhirurgicheskiy zhurnal im. A.L. Polenova.* 2015;7(4):26–32. (In Russ.)
5. Picht T, Krieg SM, Sollmann N, Rösler J, Niraula B, Neuvonen T, et al. A comparison of language mapping by preoperative navigated transcranial magnetic stimulation and direct cortical stimulation during awake surgery. *Neurosurgery.* 2013;72(5):808–819. PMID: 23385773 <https://doi.org/10.1227/NEU.0b013e3182889e01>
6. Forster MT, Limbart M, Seifert V, Senft C. Test-retest reliability of navigated transcranial magnetic stimulation of the motor cortex. *Neurosurgery.* 2014;10(Suppl 1):51–56. PMID: 23842557 <https://doi.org/10.1227/NEU.0000000000000075>
7. Forster MT, Hattingen E, Senft C, Gasser T, Seifert V, Szelenyi A. Navigated transcranial magnetic stimulation and functional magnetic resonance imaging: advanced adjuncts in preoperative planning for central region tumors. *Neurosurgery.* 2011;68(5):1317–1325. PMID: 21273929 <https://doi.org/10.1227/NEU.0b013e31820b528c>
8. Sollmann N, Meyer B, Krieg SM. Implementing functional preoperative mapping in the clinical routine of a neurosurgical department: technical note. *World Neurosurg.* 2017;103:94–105. PMID: 28377253 <https://doi.org/10.1016/j.wneu.2017.03.114>
9. Saisanen L, Julkunen P, Kemppainen S, Danner N, Immonen A, Mervala E, et al. Locating and outlining the cortical motor representation areas of facial muscles with navigated transcranial magnetic stimulation. *Neurosurgery.* 2015;77(3):394–495. PMID: 26035404 <https://doi.org/10.1227/NEU.0000000000000078>
10. Takahashi S, Vajkoczy P, Picht T. Navigated transcranial magnetic stimulation for mapping the motor cortex in patients with rolandic brain tumors. *Neurosurg Focus.* 2013;34(4):E3. PMID: 23544409 <https://doi.org/10.1227/10.3171/2013.1.FOCUS133>
11. Krieg SM, Shiban E, Buchmann N, Gempt J, Foerschler A, Meyer B, et al. Utility of presurgical navigated transcranial magnetic brain stimulation for the resection of tumors in eloquent motor areas. *J Neurosurg.* 2012;116(5):994–1001. PMID: 22304452 <https://doi.org/10.3171/2011.12.JNS111524>
12. Picht T, Schulz J, Vajkoczy P. The preoperative use of navigated transcranial magnetic stimulation facilitates early resection of suspected low-grade gliomas in the motor cortex. *Acta Neurochir.* 2013;155(10):1813–1821. PMID: 23996233 <https://doi.org/10.1007/s00701-013-1839-1>
13. Ille S, Sollmann N, Butenschon VM, Meyer B, Ringe F, Krieg SM. Resection of highly language-eloquent brain lesions based purely on rTMS language mapping without awake surgery. *Acta Neurochir (Wien).* 2016;158(12):2265–2275. PMID: 27688208 <https://doi.org/10.1007/s00701-016-2968-0>
14. Raffa G, Scibilia A, Conti A, Cardali SM, Rizzo V, Terranova C, et al. Multimodal surgical treatment of high-grade gliomas in the motor area: the impact of the combination of navigated transcranial magnetic stimulation and fluorescein-guided resection. *World Neurosurg.* 2019;128:e378–e390. PMID: 31029822 <https://doi.org/10.1016/j.wneu.2019.04.158>
15. Picht T, Schulz J, Hanna M, Schmidt S, Suess O, Vajkoczy P. Assessment of the influence of navigated transcranial magnetic stimulation on surgical planning for tumors in or near the motor cortex. *Neurosurgery.* 2012;70(5):1248–1257. PMID: 22127045 <https://doi.org/10.1227/NEU.0b013e318243881e>
16. Jung J, Lavrador JP, Patel S, Giamouriadis A, Lam J, Bhangoo R, et al. First United Kingdom experience of navigated transcranial magnetic stimulation in preoperative mapping of brain tumors. *World Neurosurg.* 2019;122:e1578–e1587. PMID: 30476661 <https://doi.org/10.1016/j.wneu.2018.11.114>
17. Raffa G, Scibilia A, Conti A, Ricciardo G, Rizzo V, Morelli A, et al. The role of navigated transcranial magnetic stimulation for surgery of motor-eloquent brain tumors: a systematic review and meta-analysis. *Clin Neurol Neurosurg.* 2019;180:7–17. PMID: 30870762 <https://doi.org/10.1016/j.clineuro.2019.03.003>
18. Tarapore PE, Tate MC, Findlay AM, Honma SM, Mizuiri D, Berger MS, Nagarajan SS. Preoperative multimodal motor mapping: a comparison of magnetoencephalography imaging, navigated transcranial magnetic stimulation, and direct cortical stimulation. *J Neurosurg.* 2012;117(2):354–362. PMID: 22702484 <https://doi.org/10.3171/2012.5.JNS112124>
19. Sollmann N, Picht T, Makela JP, Meyer B, Ringel F, Krieg SM. Navigated transcranial magnetic stimulation for preoperative language mapping in a patient with a left frontoopercular glioblastoma. *J Neurosurg.*

- 2013;118(1):175–179. PMID: 23101450 <https://doi.org/10.3171/2012.9.JNS121053>
20. Takahashi S, Jussen D, Vajkoczy P, Picht T. Plastic relocation of motor cortex in a patient with LGG (low grade glioma) confirmed by NBS (navigated brain stimulation). *Acta Neurochir (Wien)*. 2012;154(11):2003–2008. PMID: 22945898 <https://doi.org/10.1007/s00701-012-1492-0>
  21. Ille S, Sollmann N, Hauck T, Maurer S, Tanigawa N, Obermueller T, et al. Impairment of preoperative language mapping by lesion location: a functional magnetic resonance imaging, navigated transcranial magnetic stimulation, and direct cortical stimulation study. *J Neurosurg*. 2015;123(2):314–324. PMID: 25884257 <https://doi.org/10.3171/2014.10.JNS141582>
  22. Kato N, Schilt S, Schneider H, Frey D, Kufeld M, Vajkoczy P, et al. Functional brain mapping of patients with arteriovenous malformations using navigated transcranial magnetic stimulation: first experience in ten patients. *Acta Neurochir (Wien)*. 2014;156(5):885–895. PMID: 24639144 <https://doi.org/10.1007/s00701-014-2043-7>
  23. Ottenhausen M, Krieg SM, Meyer B, Ringel F. Functional preoperative and intraoperative mapping and monitoring: increasing safety and efficacy in glioma surgery. *Neurosurg Focus*. 2015;38(1):E3. PMID: 2552283 <https://doi.org/10.3171/2014.10.FOCUS14611>
  24. Picht T, Schmidt S, Woitzik J, Suess O. Navigated brain stimulation for preoperative cortical mapping in parietal patients: case report of a hemiplegic patient. *Neurosurgery*. 2011;68(5):E1475–E1480. PMID: 21307789 <https://doi.org/10.1227/NEU.0b013e318210c7df>
  25. Raffa G, Quattropani MC, Germano A. When imaging meets neurophysiology: the value of navigated transcranial magnetic stimulation for preoperative neurophysiological mapping prior to brain tumor surgery. *Neurosurg Focus*. 2019; 47(6):E10. PMID: 31786549 <https://doi.org/10.3171/2019.9.FOCUS19640>
  26. Raffa G, Conti A, Scibilia A, Cardali SM, Esposito F, Angileri FF, et al. The impact of diffusion tensor imaging fiber tracking of the corticospinal tract based on navigated transcranial magnetic stimulation on surgery of motor-eloquent brain lesions. *Neurosurgery*. 2018;83(4):768–782. PMID: 29211865 <https://doi.org/10.1093/neuros/nyx554>
  27. Sollmann N, Kelm A, Ille S, Schroder A, Zimmer C, Ringel F, et al. Setup presentation and clinical outcome analysis of treating highly language-eloquent gliomas via preoperative navigated transcranial magnetic stimulation and tractography. *Neurosurg Focus*. 2018;44(6):E2. PMID: 29852769 <https://doi.org/10.3171/2018.3.FOCUS1838>
  28. Hendrix P, Senger S, Simgen A, Griessenauer CJ, Oertel J. Preoperative rTMS language mapping in speech-eloquent brain lesions resected under general anesthesia: a pair-matched cohort study. *World Neurosurg*. 2017;100:425–433. PMID: 28109861 <https://doi.org/10.1016/j.wneu.2017.01.041>
  29. Ille S, Drummer K, Giglhuber K, Conway N, Maurer S, Meyer B, et al. Mapping of arithmetic processing by navigated repetitive transcranial magnetic stimulation in patients with parietal brain tumors and correlation with postoperative outcome. *World Neurosurg*. 2018;114:e1016–e1030. PMID: 29597021 <https://doi.org/10.1016/j.wneu.2018.03.136>
  30. Forster MT, Hoecker AC, Kang JS, Quick J, Seifert V, Hattingen E, et al. Does navigated transcranial stimulation increase the accuracy of tractography? A prospective clinical trial based on intraoperative motor evoked potential monitoring during deep brain stimulation. *Neurosurgery*. 2015;76(6):766–776. PMID: 25988930 <https://doi.org/10.1227/NEU.0000000000000715>
  31. Krieg SM, Buchmann NH, Gempt J, Shibana E, Meyer B, Ringel F. Diffusion tensor imaging fiber tracking using navigated brain stimulation – a feasibility study. *Acta Neurochir (Wien)*. 2012;154(3):555–563. PMID: 22270529 <https://doi.org/10.1007/s00701-011-1255-3>
  32. Rosenstock T, Grittner U, Acker G, Schwarzer V, Kulchytka N, Vajkoczy P, et al. Risk stratification in motor area-related glioma surgery based on navigated transcranial magnetic stimulation data. *J Neurosurg*. 2017;126(4):1227–1237. PMID: 27257834 <https://doi.org/10.3171/2016.4.JNS152896>
  33. Sollmann N, Wildschuetz N, Kelm A, Conway N, Moser T, Bulubas L, et al. Associations between clinical outcome and navigated transcranial magnetic stimulation characteristics in patients with motor-eloquent brain lesions: a combined navigated transcranial magnetic stimulation-diffusion tensor imaging fiber tracking approach. *J Neurosurg*. 2018;128(3):800–810. PMID: 28562239 <https://doi.org/10.3171/2016.11.JNS162322>
  34. Takakura T, Muragaki Y, Tamura M, Maruyama T, Nitta M, Niki C, et al. Navigated transcranial magnetic stimulation for glioma removal: prognostic value in motor function recovery from postsurgical neurological deficits. *J Neurosurg*. 2017;127(4):877–891. PMID: 28059664 <https://doi.org/10.3171/2016.8.JNS16442>
  35. Conway N, Wildschuetz N, Moser T, Bulubas L, Sollmann N, Tanigawa N, et al. Cortical plasticity of motor-eloquent areas measured by navigated transcranial magnetic stimulation in patients with glioma. *J Neurosurg*. 2017;127(5):981–991. PMID: 28106500 <https://doi.org/10.3171/2016.9.JNS161595>
  36. Forster MT, Senft C, Hattingen E, Lorei M, Seifert V, Szelenyi A. Motor cortex evaluation by nTMS after surgery of central region tumors: a feasibility study. *Acta Neurochir (Wien)*. 2012;154(8):1351–1359. PMID: 22669201 <https://doi.org/10.1007/s00701-012-1403-4>
  37. Ille S, Picht T, Shibana E, Meyer B, Vajkoczy P, Krieg SM. The impact of nTMS mapping on treatment of brain AVMs. *Acta Neurochir (Wien)*. 2018;160(3):567–578. PMID: 29368047 <https://doi.org/10.1007/s00701-018-3475-2>
  38. Germano A, Raffa G, Conti A, Fiore P, Cardali SM, Esposito F, et al. Modern treatment of brain arteriovenous malformations using preoperative planning based on navigated transcranial magnetic stimulation: a revisit of the concept of eloquence. *World Neurosurg*. 2019;131:371–384. PMID: 31247351 <https://doi.org/10.1016/j.wneu.2019.06.119>
  39. Zdunczyk A, Fleischmann R, Schulz J, Vajkoczy P, Picht T. The reliability of topographic measurements from navigated transcranial magnetic stimulation in healthy volunteers and tumor patients. *Acta Neurochir (Wien)*. 2013;155(7):1309–1317. PMID: 23479092 <https://doi.org/10.1007/s00701-013-1665-5>
  40. Butenschon VM, Ille S, Sollmann N, Meyer B, Krieg SM. Cost-effectiveness of preoperative motor mapping with navigated transcranial magnetic stimulation in patients with high-grade glioma. *Neurosurg Focus*. 2018;44(6):E18. PMID: 29852777 <https://doi.org/10.3171/2018.3.FOCUS1830>
  41. Kombos T, Picht T, Derdilopoulos A, Suess O. Impact of intraoperative neurophysiological monitoring on surgery of high-grade gliomas. *J Clin Neurophysiol*. 2009;26(6):422–425. PMID: 19952567 <https://doi.org/10.1097/WNP.0b013e3181c2c0dc>
  42. Ille S, Sollmann N, Hauck T, Maurer S, Tanigawa N, Obermueller T, et al. Combined noninvasive language mapping by navigated transcranial magnetic stimulation and functional MRI and its comparison with direct cortical stimulation. *J Neurosurg*. 2015;123(1):212–225. PMID: 25748306 <https://doi.org/10.3171/2014.9.JNS14929>
  43. Mirbagheri A, Schneider H, Zdunczyk A, Vajkoczy P, Picht T. NTMS mapping of non-primary motor areas in brain tumour patients and healthy volunteers. *Acta Neurochir (Wien)*. 2020;162(2):407–416. PMID: 31768755 <https://doi.org/10.1007/s00701-019-04086-x>
  44. Picht T, Schmidt S, Brandt S, Frey D, Hannula H, Neuvonen T, et al. Preoperative functional mapping for rolandic brain tumor surgery: comparison of navigated transcranial magnetic stimulation to direct cortical stimulation. *Neurosurgery*. 2011;69(3):581–589. PMID: 21430587 <https://doi.org/10.1227/NEU.0b013e3182181b89>

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

### Дмитриев Александр Юрьевич

кандидат медицинских наук, врач-нейрохирург, нейрохирургическое отделение для лечения больных с сосудистыми заболеваниями головного мозга ГБУЗ «НИИ СП им. Н.В. Склифосовского ДЗМ», ассистент кафедры нейрохирургии и нейрореанимации ФГБОУ ВО «МГМСУ им. А.И. Евдокимова»;

<https://orcid.org/0000-0002-7635-9701>, [dmitriev@neurosklif.ru](mailto:dmitriev@neurosklif.ru);

70%: разработка дизайна исследования, обзор публикаций по теме статьи, написание текста статьи

### Дашьян Владимир Григорьевич

доктор медицинских наук, врач-нейрохирург, нейрохирургическое отделение ГБУЗ «НИИ СП им. Н.В. Склифосовского ДЗМ», профессор кафедры нейрохирургии и нейрореанимации ФГБОУ ВО «МГМСУ им. А.И. Евдокимова»;

<https://orcid.org/0000-0002-5847-9435>, [v485@bk.ru](mailto:v485@bk.ru);

30%: разработка дизайна исследования, редактирование статьи

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов**

# Transcranial magnetic stimulation in neurosurgery

A.Yu. Dmitriev<sup>1,2</sup> ✉, V.G. Dashyan<sup>1,2</sup>

Neurosurgical Department for the Treatment of Patients with Cerebral Vascular Diseases

<sup>1</sup> N.V. Sklifosovsky Research Institute for Emergency Medicine

3 Bolshaya Sukharevskaya Square, Moscow 129090, Russian Federation

<sup>2</sup> A.I. Yevdokimov Moscow State University of Medicine and Dentistry

20, bldg 1 Delegatskaya St., Moscow 127473, Russian Federation

✉ **Contacts:** Aleksandr Yu. Dmitriev, Candidate of Medical Sciences, Neurosurgeon, Neurosurgical Department for the Treatment of Patients with Cerebral Vascular Diseases, N.V. Sklifosovsky Research Institute for Emergency Medicine. Email: dmitriev@neurosklif.ru

**ABSTRACT** Transcranial magnetic stimulation (TMS) is a relatively new diagnostic and therapeutic method. Its widespread introduction into neurosurgical practice began in 2009. The method is used for non-invasive detection of eloquent brain areas. The combination with tractography facilitates the projection of pathways. The review summarizes the main results of TMS in the planning of neurosurgical interventions. We described the principle of method, analyzed its benefits and shortcomings, compared it with direct cortical stimulation which is a "gold standart" in detection of eloquent brain centers.

**Keywords:** transcranial magnetic stimulation, TMS, eloquent brain areas, preoperative planning, neuronavigation

**For citation** Dmitriev AYu, Dashyan VG. Transcranial magnetic stimulation in neurosurgery. *Russian Sklifosovsky Journal of Emergency Medical Care*. 2022;11(1):96–103. <https://doi.org/10.23934/2223-9022-2022-11-1-96-103> (in Russ.)

**Conflict of interest** Authors declare lack of the conflicts of interests

**Acknowledgments, sponsorship** The study has no sponsorship

## Affiliations

Aleksandr Yu. Dmitriev	Candidate of Medical Sciences, Neurosurgeon, Neurosurgical Department for the Treatment of Patients with Cerebral Vascular Diseases, N.V. Sklifosovsky Research Institute for Emergency Medicine, Assistant of the Department of Neurosurgery and Neuroresuscitation, A.I. Yevdokimov Moscow State University of Medicine and Dentistry; <a href="https://orcid.org/0000-0002-7635-9701">https://orcid.org/0000-0002-7635-9701</a> , dmitriev@neurosklif.ru; 70%, development of research design, review of publications on the topic of the article, writing the text of the article
Vladimir G. Dashyan	Doctor of Medical Sciences, Neurosurgeon, Neurosurgical department of N.V. Sklifosovsky Research Institute for Emergency Medicine, Professor of the Department of Neurosurgery and Neuroresuscitation of A.I. Yevdokimov Moscow State University of Medicine and Dentistry; <a href="https://orcid.org/0000-0002-5847-9435">https://orcid.org/0000-0002-5847-9435</a> , v485@bk.ru; 30%, research design development, article editing

Received on 16.03.2021

Review completed on 21.05.2021

Accepted on 27.12.2021

Поступила в редакцию 16.03.2021

Рецензирование завершено 21.05.2021

Принята к печати 27.12.2021