

DOI: <https://doi.org/10.17650/2782-3202-2025-5-1-77-83>

Перспективы использования транскраниальной магнитной стимуляции в реабилитации детей с опухолями головного мозга. Обзор литературы

В.Х. Харбедия¹, М.А. Капранова¹, Е.А. Саленко¹, А.А. Глазырина¹, Е.Е. Петряйкина², Э.В. Кумирова³

¹Федеральный детский реабилитационный центр «Кораблик» — структурное подразделение Российской детской клинической больницы — филиала ФГАОУ ВО «Российский национальный исследовательский медицинский университет им. Н.И. Пирогова» Минздрава России; Россия, 142114 Московская область, Подольск, ул. Высотная, 4а;

²Российская детская клиническая больница — филиал ФГАОУ ВО «Российский национальный исследовательский медицинский университет им. Н.И. Пирогова» Минздрава России; Россия, 119571 Москва, Ленинский пр-кт, 117;

³ГБУЗ г. Москвы «Морозовская детская городская клиническая больница Департамента здравоохранения г. Москвы»; Россия, 119049 Москва, 4-й Добрынинский пер., 1/9

Контакты: Вахтанг Хвичевич Харбедия kharbediya1992@mail.ru

Транскраниальная магнитная стимуляция (ТМС) — технология нейромодуляции, позволяющая целенаправленно стимулировать и ингибировать корковые области головного мозга. В настоящее время ТМС зарекомендовала себя как метод с доказанной эффективностью для лечения некоторых психоневрологических расстройств у детей, в связи с чем возрастает интерес к изучению новых вариантов применения ТМС у пациентов с острыми и хроническими неврологическими дефицитами. У детей с опухолями головного мозга выявляют до 90 % неврологических нарушений. Однако на сегодняшний день недостаточно данных об использовании технологии ТМС в детской онкологической нейрореабилитации.

Ключевые слова: реабилитация, опухоль головного мозга, центральная нервная система, онкология, транскраниальная магнитная стимуляция

Для цитирования: Харбедия В.Х., Капранова М.А., Саленко Е.А. и др. Перспективы использования транскраниальной магнитной стимуляции в реабилитации детей с опухолями головного мозга. Обзор литературы. MD-Onco 2025;5(1):77–83.

DOI: <https://doi.org/10.17650/2782-3202-2025-5-1-77-83>

Prospects for the use of transcranial magnetic stimulation in the rehabilitation of children with brain tumors. Literature review

V.Kh. Kharbediya¹, M.A. Kapranova¹, E.A. Salenko¹, A.A. Glazyrina¹, E.E. Petryaykina², E.V. Kumirova³

¹Federal Children's Rehabilitation Center "Korablik" — structural division of the Russian Children's Clinical Hospital — branch of the N.I. Pirogov Russian National Research Medical University, Ministry of Health of Russia; 4a Vysotnaya St., Podolsk, Moscow region 142114, Russia;

²Russian Children's Clinical Hospital — branch of the N.I. Pirogov Russian National Research Medical University, Ministry of Health of Russia; 117 Leninskiy Ave., Moscow 119571, Russia;

³Morozovskaya City Children's Clinical Hospital, Moscow Healthcare Department; 1/9 4th Dobryninsky Ln., Moscow 119049, Russia

Contacts: Vakhtang Khvichevich Kharbediya kharbediya1992@mail.ru

Transcranial magnetic stimulation (TMS) is a neuromodulation technology capable of targeted stimulation and inhibition of cortical areas of the brain. Currently, TMS has established itself as a method with proven effectiveness in the treatment of some psychoneurological disorders in children. In this regard, there is increasing interest in studying new options for the use of TMS in patients with acute and chronic neurological deficits. In children with brain tumors, up to 90 % of neurological disorders are determined. However, to date, there is insufficient data on the use of TMS technology in pediatric oncological neurorehabilitation.

Keywords: rehabilitation, brain tumor, central nervous system, oncology, transcranial magnetic stimulation

For citation: Kharbediya V.Kh., Kapranova M.A., Salenko E.A. et al. Prospects for the use of transcranial magnetic stimulation in the rehabilitation of children with brain tumors. Literature review. MD-Onco 2025;5(1):77–83. (In Russ.).

DOI: <https://doi.org/10.17650/2782-3202-2025-5-1-77-83>

Введение

Среди онкологических заболеваний детского населения гемобластозы и опухоли центральной нервной системы встречаются наиболее часто. И именно при данных вариантах опухолей получены наиболее высокие показатели выживаемости. Так, при лимфомах у детей многолетняя общая выживаемость достигает 85,6–91,2 % даже при распространенных (III–IV) стадиях заболевания, а при медуллобластоме – 76,4 % [1–3]. Но не менее важной проблемой является токсичность проведенного лечения [4, 5], для коррекции которой все большее значение приобретает реабилитация детей, перенесших онкологическое заболевание.

Транскраниальная магнитная стимуляция (ТМС) – неинвазивный метод стимуляции головного мозга, в основе которого лежит применение магнитных токов для индукции электрической активности, способной деполяризовать определенные участки коры головного мозга [6]. Важно отметить, что возможно применение ТМС прицельно к «заинтересованным» областям головного мозга с использованием бескаркасных стереотаксических методов. Генерируемое электрическое поле может быть модулировано на основе формы волны магнитного импульса, частоты и схемы стимуляции, а также таких переменных, как ориентация линий тока, индуцированных в головном мозге при возбуждении нейронов [7]. Таким образом, вышеперечисленные элементы позволяют индивидуально настраивать параметры стимуляции, специфичные для каждого пациента.

Существует 3 типа общих протоколов ТМС, включая одиночные (монофазные), парные (бифазные) и повторяющиеся (ритмичные) импульсы ТМС. Наиболее часто протокол ритмической ТМС (рТМС) используют как для снижения уровня возбуждения, так и с целью торможения работы корковых областей головного мозга. В рТМС несколько одиночных импульсных стимулов доставляются с заданными частотой, интенсивностью и продолжительностью по времени, причем эффект зависит от заданных параметров стимуляции [8]. Медленная рТМС, например при частоте 1 Гц или 1 магнитном импульсе в секунду, продемонстрировала ингибирующий эффект, тогда как быстрая рТМС (10 или 20 Гц) продемонстрировала возбуждающие эффекты на функцию головного мозга [9–11].

Достоверные клинические данные, свидетельствующие об эффективности применения ТМС, получены в результате исследований в психоневрологической практике. Депрессия является наиболее изученным состоянием (диагнозом), при котором применяют ТМС [12, 13]. Для уменьшения симптомов депрессии у пациентов с рефрактерной формой заболевания и отсутствием клинического эффекта от медикаментозной терапии 1-й линии Управление по контролю качества пищевых продуктов и лекарственных препаратов США (FDA) в 2008 г. одобрило проведение рТМС левой дорсолатеральной префронтальной коры в качестве вспо-

могательного лечения [14]. Также существуют исследования, показывающие положительный эффект применения рТМС при таких состояниях, как болевой синдром, двигательные расстройства, обсессивно-компульсивное расстройство, шизофрения, зависимость (аддикция) и другие расстройства сознания [6].

Концепция использования рТМС в нейрореабилитации не нова, и в первую очередь метод был внедрен у пациентов после инсульта и с церебральным параличом. В реабилитации данной когорты пациентов обычно применяют протокол, известный как стимуляция тета- (θ) вспышкой, который продемонстрировал отсутствие побочных эффектов лечения по сравнению с традиционными протоколами рТМС [15]. Этот протокол подразделяется на доставку низкочастотной, ингибирующей θ -вспышки в контралатеральное полушарие (непрерывная θ -вспышка) или высокочастотного, стимулирующего импульса в ипсилатеральное пораженное полушарие (прерывистая θ -вспышка). Полученные данные позволяют предположить, что подавление возбудимости неповрежденного или контралатерального полушария путем использования θ -вспышек в каждом конкретном случае приводит к улучшению функции у пациентов с парезами языка, повышению внимания, восстановлению памяти и соматосенсорной обработки в сочетании с физической реабилитацией [16, 17]. ТМС с прерывистой θ -вспышкой также продемонстрировала восстановление функции мелкой моторики и речеобразования у детей с церебральным параличом [18, 19].

С учетом опыта применения ТМС для реабилитации пациентов с неврологическими нарушениями есть основания полагать, что данная технология может быть дополнительной опцией в восстановительном лечении детей с опухолями головного мозга (ОГМ). По данным литературы, ТМС эффективно используется до и во время нейрохирургических операций для коркового картирования речевых и двигательных функций [20]. Однако в настоящее время недостаточно исследований, демонстрирующих результаты применения ТМС в реабилитации детей с ОГМ.

Материалы и методы

Обзор литературы выполнен на основе научных данных, поиск которых осуществлялся на информационном профильном ресурсе PubMed, за прошедший 5-летний период (до декабря 2024 г.). Первоначально запрос сформулировали с использованием набора терминов на английском языке – «транскраниальная магнитная стимуляция, опухоль головного мозга, реабилитация». В результате было найдено и в последующем проанализировано 26 работ. Только в 8 работах было описано использование ТМС в качестве реабилитации у пациентов с ОГМ, при этом не было ни одного исследования, связанного с применением этого метода у детей.

Дальнейший поиск выполнен с использованием другого набора терминов — «транскраниальная магнитная стимуляция, нейрохирургическая операция, опухоль головного мозга», — что, в свою очередь, позволило найти 133 работы, однако все они были посвящены диагностическим методам до и во время хирургического лечения. При добавлении в поисковую строку уточнения «в детском возрасте» отображалось 16 результатов, из которых только в 1 исследовании методика ТМС использовалась в качестве навигации при нейрохирургической операции. Также было найдено и включено в обзор 1 двойное слепое рандомизированное контролируемое исследование с применением рТМС у нейроонкологических пациентов в реабилитационных целях.

Результаты

Транскраниальная магнитная стимуляция в реабилитации пациентов с опухолями головного мозга

В обзор литературы включены 3 исследования с описанием клинических случаев в общей сложности 4 пациентов [21–23] и 1 рандомизированное двойное слепое плацебо-контролируемое исследование с участием 39 пациентов [24]. Для подтверждения концепции применения данной технологии у детей была рассмотрена публикация об использовании ТМС у пациентов с детским церебральным параличом (ДЦП) [18]. Также рассмотрена работа по данной теме, включившая данные 34 пациентов с глиомой головного мозга после краниотомии [20].

В работе W. Kakuda и соавт. [21] представлен случай пациента с диагнозом «субфронтальная глиома слева» после хирургического лечения с осложнением в виде остаточного гемипареза правой верхней конечности, в статусе 5-летней ремиссии. Для реабилитации пациента использовали (без навигации) контралатеральную ингибиторную ТМС для воздействия на правую моторную кору головного мозга. Низкочастотную (1 Гц) рТМС применяли на каждом сеансе в объеме 1200 импульсов. В процессе терапии по самым большим вызванным двигательным потенциалам в 1-й фаланге левой верхней конечности (дорсальной межкостной мышце) было определено оптимальное место для стимуляции в коре головного мозга. Интенсивность стимуляции была установлена на уровне 90 % от двигательного порога мышцы. Пациент испытывал головную боль и тошноту в течение 3-недельного курса лечения, никаких других побочных эффектов или ухудшения неврологических симптомов при терапии не зафиксировано. Пациент прошел 22 ежедневных сеанса ТМС, в результате которых отмечено улучшение функции левой верхней конечности со стойким положительным эффектом за период наблюдения продолжительностью 4 нед от последнего сеанса лечения.

В работе J.A. Barcia и соавт. [22] описан клинический случай пациента с олигодендроглиомой левой прецентральной извилины, субтотальным поражением в зоне Брока, который перенес хирургическое лечение в объеме краниотомии, субтотальной резекции новообразования головного мозга. Через 9 мес после операции отмечено прогрессирование заболевания с ухудшением клинической симптоматики в виде экспрессивной афазии. Пациенту начата терапия по протоколу ипсилатерально возбуждающей ТМС в зону Брока ежедневно в течение 12 дней. Использовали нейронавигатор BrainSight (Rogue Research, Inc., Канада) для направления центра стимуляции в заднюю часть нижней лобной извилины (непосредственно перед опухолью). Патологическая активность зоны Брока была подтверждена по данным магнитно-резонансной томографии. Параметры стимуляции зоны головного мозга: мощность 60 %, частота 45 Гц, объем — 3 импульса и 5 вспышек за 40 циклов с продолжительностью цикла 1,0 с. За период лечения пациента сразу после каждого сеанса ТМС констатировали ухудшение функции речеобразования, также отмечалось нарушение сознания в виде трудностей в понимании и осмыслении речи. Однако после занятий с логопедом и нейропсихологом зафиксировано улучшение вышеуказанных параметров по сравнению с исходными значениями. Исследование продемонстрировало, что базовые показатели функции зоны Брока улучшались при комбинации с логопедической коррекцией в ходе эксперимента, но наблюдалась тенденция возврата к исходным параметрам после каждого сеанса ТМС. Ученые отметили сложность в интерпретации результатов ввиду прогрессирования опухоли в период восстановительного лечения.

В работе С.М. О'Neal и соавт. [23] описано 2 клинических случая с использованием контралатеральной ингибирующей ТМС (M1-сегмент средней мозговой артерии правой области) у 1 больного (пациент 1) и в области нижней лобной извилины у другого (пациент 2). Пациентам выполнено хирургическое лечение в объеме резекции анапластической астроцитомы левой островковой области и глиобластомы левой височной области соответственно. Навигационная ТМС с использованием устройства MagVenture MagPro была начата обоим пациентам в раннем послеоперационном периоде (24–48 ч от нейрохирургического лечения). Оба пациента получили медленную рТМС: 5 Гц с 200 импульсами при 80 % максимального значения двигательного порога. Пациент 1 получил всего 1 процедуру ТМС, в то время как другой пациент — 3 сеанса ТМС. Ни у одного из пациентов не наблюдалось улучшения показателей двигательной функции и компенсации возникшей афазии. Хотя результаты данной работы не подтверждают эффективность применения рТМС, авторы отметили отсутствие побочных реакций или нежелательных явлений. Также

не было зафиксировано ни одного эпилептического приступа, несмотря на присутствие в анамнезе судорожной готовности у пациента 2.

В 2021 г. S. Ille и соавт. (коллектив авторов из Мюнхена, Германия) опубликовали данные двойного слепого рандомизированного исследования у пациентов с глиомой головного мозга, которым проводилась навигационная ТМС в рамках восстановительного лечения [24]. В результате исследования ученые пришли к выводу о безопасности и эффективности метода ТМС в реабилитации у 39 больных с ОГМ.

В рандомизированное контролируемое исследование Y. He и соавт. включили 31 пациента детского возраста с ДЦП после контралатеральной ингибирующей ТМС под навигацией в двигательных областях коры головного мозга [18]. Несмотря на разнородность группы пациентов с ДЦП и детей с ОГМ по диагнозам, их объединяли осложнения, возникшие вследствие основного заболевания, такие как острый парез конечностей. Протокол исследования для группы пациентов с ДЦП включал ежедневные сеансы ТМС на низкой частоте (1 Гц) в течение 30 мин (1800 импульсов с интенсивностью 110 % от двигательного потенциала конечности) дважды в день 5 дней в неделю на протяжении 4 нед. Исследование продемонстрировало эффективность рТМС в сочетании с традиционной физиотерапией в неврологической реабилитации детей с ДЦП и гемиплегией. Авторы отметили значимую роль ТМС в реабилитационной практике у детей с ДЦП и с учетом полученных данных сделали вывод о высоком потенциале применения ТМС в восстановительном лечении у детей с ОГМ.

Исследование группы ученых (A. Poologaindran и соавт.) из университета Кембриджа (Великобритания) подтвердило концепцию безопасного применения ТМС в рамках реабилитационного лечения 34 пациентов

с глиомой головного мозга [25]. Авторы использовали комбинацию протоколов ТМС на основе специфических для пациента аномалий нейронных связей головного мозга, которые были идентифицированы при сравнении с нормальными показателями у здоровых лиц. Таким образом, аномально гипосвязанные регионы в ипсилатеральном полушарии получали ТМС для повышения функциональной компенсации за счет снижения транскаллозального торможения на аномально гиперсвязанные регионы в контралатеральном полушарии. Такой протокол лечения ТМС, основанный на индивидуальных показателях пациентов, применяли в течение 2 нед после нейрохирургической операции по удалению глиомы. Результаты исследования продемонстрировали статистически значимые улучшения как двигательных функций ($p < 0,001$), так и процесса речеобразования ($p = 0,001$). Важно отметить, что за время исследования не было зарегистрировано ни одного случая судорог у пациентов, а побочные эффекты ограничивались лишь умеренной головной болью у 4 пациентов. Анатомические ориентиры при проведении ТМС на головной мозг представлены на рис. 1.

Таким образом, по данным литературы, нейрореабилитация с использованием ТМС продемонстрировала положительные результаты лечения в ходе нескольких рандомизированных контролируемых исследований и метаанализов у пациентов как с острыми, так и с хроническими двигательными нарушениями, а также дефектами речеобразования [16–19]. Нейрохирургическая операция – метод выбора при опухолях головного мозга. Тем не менее при вовлечении определенных областей головного мозга в патологический процесс оперативное лечение несет риск неврологических осложнений с дефицитами, затрагивающими двигательную и речевую функции пациента.

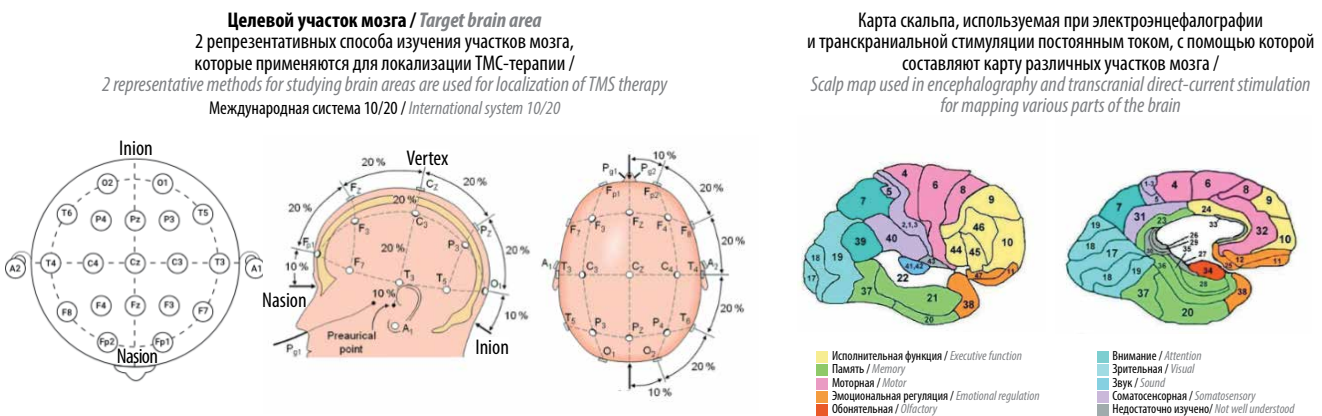


Рис. 1. Анатомические ориентиры при проведении транскраниальной магнитной стимуляции (ТМС) (по данным руководства «Инфомед-нейро» по протоколам лечения с применением ТМС)

Fig. 1. Anatomical landmarks for transcranial magnetic stimulation (TMS) (per the “Infomed-Neuro” guidelines for treatment protocols using TMS)

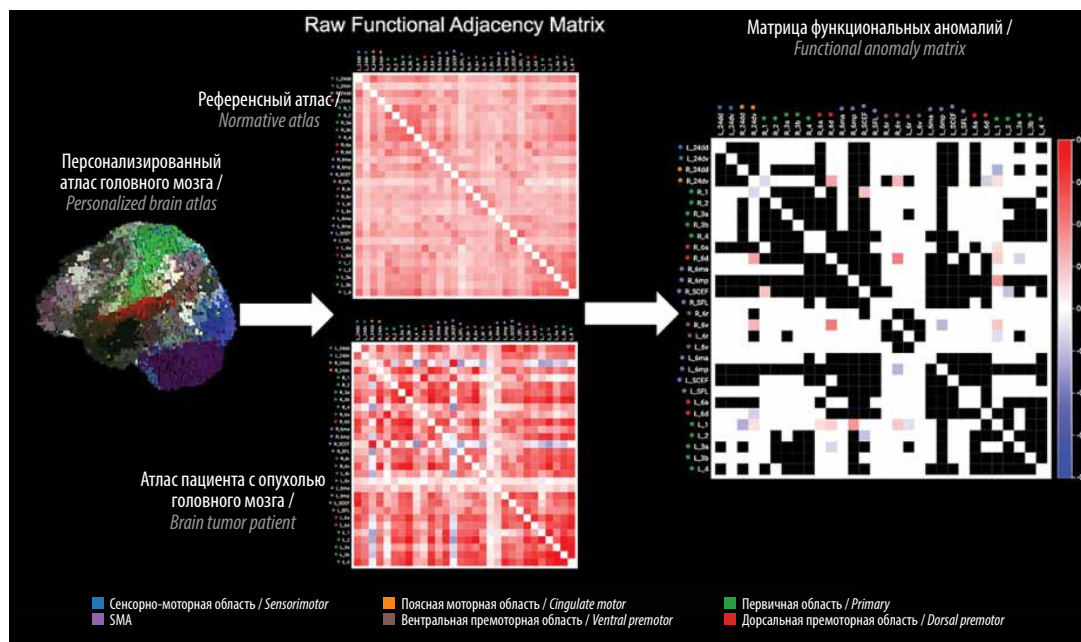


Рис. 2. Возможности применения персонализированной навигационной транскраниальной магнитной стимуляции при опухолях головного мозга в соответствии с аномалиями нейронных связей (по данным [32])

Fig. 2. Possibilities of using personalized navigated transcranial magnetic stimulation in brain tumors in accordance with anomalies of neural connections (according to [32])

Проявление данных нарушений может быть вызвано хирургическим повреждением критических корковых и подкорковых путей головного мозга, сосудистым повреждением или нарушением критических сетевых связей, участвующих в системе сложных неврологических функций. Проведение проб и разметки с помощью ТМС до хирургического вмешательства способствует картированию (дифференцировке) здорового участка головного мозга от пораженного, и как следствие, обеспечению сохранности нейронных функциональных путей [20]. Однако область применения ТМС в реабилитационных целях недостаточно изучена у когорты онкологических пациентов с двигательными и речевыми нарушениями. Принимая во внимание полученный эффект ТМС у пациентов с ДЦП, можно сделать вывод о потенциале использования методики у детей с ОГМ.

Важно отметить, что восстановительное лечение при помощи ТМС продемонстрировало отсутствие побочных и нежелательных явлений в популяции нейроонкологических больных старшего возраста. Однако имеется риск судорог у пациентов с повышенной эпиктивностью, что является наиболее серьезным известным осложнением при ТМС, тем не менее зарегистрированных случаев, по данным мировой литературы, было менее 1 % [26]. По результатам проводимых крупных исследований, не зафиксировано судорог во время ТМС у пациентов с диагнозом глиомы головного мозга [24, 25]. Этот факт наряду с отсутствием каких-либо

существенных побочных эффектов после использования ТМС у пациентов с ОГМ делает методику привлекательной для дальнейшего изучения и использования на практике. Тем не менее риск развития тех или иных осложнений должен оцениваться в каждом конкретном случае.

С точки зрения эффективности ТМС у пациентов с ОГМ анализ данных литературы показывает преимущества метода как для восстановления речи, так и для возврата функции мелкой моторики. Согласно общим данным, полученным при обзоре литературы, у 90 % больных с ОГМ отмечено улучшение функции мелкой моторики. Однако положительный эффект ТМС возможен только при курсовом лечении продолжительностью от нескольких недель до месяца.

Перспективы формирования протоколов восстановительного лечения детей с опухолями головного мозга с помощью транскраниальной магнитной стимуляции

С учетом опубликованных данных о безопасности и эффективности ТМС в нейроонкологической реабилитации для более глубокого понимания потенциала метода необходимо продолжить научные исследования, которые помогут оптимизировать алгоритмы восстановительного лечения у детей с ОГМ. Исходя из описанного в международной литературе опыта применения ТМС у детей с церебральным параличом и при психоневрологических заболеваниях, становится ясно,

что положительные результаты возможны благодаря индивидуализации метода — адаптации под конкретные цели лечения определенных групп больных [27–29]. Учитывая связь клинических проявлений симптомов с локализацией патологического процесса в головном мозге, в дальнейшем возможно персонализировать методику ТМС [30].

Важно отметить, что многие неинвазивные протоколы стимуляции основаны на стандартных краниометрических измерениях, в то время как миллиметровые отклонения при установке ТМС на коже головы пациента могут выборочно модулировать совершенно разные корковые и подкорковые связи. Однако эффективность терапии обеспечивается индивидуальным подходом на основе нейровизуализации, при котором используется анатомически точная ТМС в лечении

специфических для пациента нарушений связей головного мозга (рис. 2) [25, 31, 32].

Закключение

В настоящее время отсутствуют опубликованные данные о нейрореабилитации с применением ТМС у детей с опухолями головного мозга. Также нет достоверных сведений о безопасности метода в восстановительном лечении у детей с нейроонкологической патологией. В связи с этим применение ТМС в реабилитации у данной когорты пациентов требует проведения рандомизированных контролируемых исследований. Дальнейшая работа должна включать сравнение различных параметров и протоколов ТМС с целью определения наиболее эффективных в реабилитации детей с ОГМ.

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Валиев Т.Т., Морозова О.В., Ковригина А.М. и др. Диагностика и лечение анапластических крупноклеточных лимфом у детей. Гематология и трансфузиология 2012;57(1):3–9. Valiev T.T., Morozova O.V., Kovrigina A.M. et al. Diagnosis and treatment of anaplastic large cell lymphomas in children. Hematologiya i transfuziologiya = Hematology and Transfusiology 2012;57(1):3–9. (In Russ.).
2. Валиев Т.Т., Попа А.В., Левашов А.С. и др. Неходжкинские лимфомы у детей: 25 лет терапии. Клиническая онкогематология 2016;9(4):420–37. DOI: 10.21320/2500-2139-2016-9-4-420-437 Valiev T.T., Popa A.V., Levashov A.S. et al. Non-Hodgkin's lymphoma in children: 25 years of therapy. Klinicheskaya onkogematologiya = Clinical Oncohematology 2016;9(4):420–37. (In Russ.). DOI: 10.21320/2500-2139-2016-9-4-420-437
3. Левашов А.С., Загидуллина С.Р., Валиев Т.Т. и др. Опыт применения протокола LIKE-SJMB03 в лечении детей с медуллобластомой в возрастной группе старше 3 лет: результаты межцентрового пилотного исследования. Современная онкология 2024;26(1):80–6. DOI: 10.26442/18151434.2024.1.202594 Levashov A.S., Zagidullina S.R., Valiev T.T. et al. Experience of LIKE-SJMB03 protocol in treatment of children with medulloblastoma in the age group over 3 years: results of an intercenter pilot study. Sovremennaya onkologiya = Journal of Modern Oncology 2024;26(1):80–6. (In Russ.). DOI: 10.26442/18151434.2024.1.202594
4. Валиев Т.Т., Шервашидзе М.А., Бельшева Т.С. Оценка токсичности терапии острого лимфобластного лейкоза по протоколу ALL IC-BFM 2002. Онкогематология 2022;17(3):137–59. DOI: 10.17650/1818-8346-2022-17-3-137-159 Valiev T.T., Shervashidze M.A., Belysheva T.S. Toxicity assessment of acute lymphoblastic leukemia treatment protocol ALL IC-BFM 2002. Onkogematologiya = Oncohematology 2022;17(3):137–59. (In Russ.). DOI: 10.17650/1818-8346-2022-17-3-137-159
5. Гурьева О.Д., Савельева М.И., Валиев Т.Т. Генетические основы клинических вариантов токсичности химиотерапии у детей с острым лимфобластным лейкозом (обзор литературы). Российский журнал детской гематологии и онкологии 2021;8(4):60–70. DOI: 10.21682/2311-1267-2021-8-4-60-70 Gurieva O.D., Savelyeva M.I., Valiev T.T. Genetic basis of clinical variants of chemotherapy toxicity in children with acute lymphoblastic leukemia (literature review). Rossiyskiy zhurnal detskoy gemaologii i onkologii = Russian Journal of Pediatric Hematology and Oncology 2021;8(4):60–70. (In Russ.). DOI: 10.21682/2311-1267-2021-8-4-60-70
6. Пирадов М.А., Бакулин И.С., Забиров А.Х. и др. Транскраниальная магнитная стимуляция в клинической и исследовательской практике. Под ред. акад. РАН М.А. Пирадова. М.: Научное издание, 2024. 584 с. Piradov M.A., Bakulin I.S., Zabirova A.Kh. et al. Transcranial magnetic stimulation in clinical and research practice. Ed. by M.A. Piradov. Moscow: Nauchnoye izdaniye, 2024. 584 p.
7. Klomjai W., Katz R., Lackmy-Vallee A. Basic principles of transcranial magnetic stimulation (TMS) and repetitive TMS (rTMS). Ann Phys Rehabil Med 2015;58(4):208–13. DOI: 10.1016/j.rehab.2015.05.005
8. Лагода Д.Ю., Добрынина Л.А., Супонева Н.А. и др. Ритмическая транскраниальная магнитная стимуляция в терапии умеренных когнитивных расстройств при церебральной микроангиопатии. Анналы клинической и экспериментальной неврологии 2021;15(4):5–14. DOI: https://doi.org/10.54101/ACEN.2021.4.1 Lagoda D.Yu., Dobrynina L.A., Suponeva N.A. et al. Repetitive transcranial magnetic stimulation in the treatment of mild cognitive impairment due to cerebral small vessel disease. Annaly klinicheskoy i eksperimentalnoy nevrologii = Annals of Clinical and Experimental Neurology 2021;15(4):5–14. DOI: https://doi.org/10.54101/ACEN.2021.4.1
9. Maeda F., Keenan J.P., Tormos J.M. et al. Modulation of corticospinal excitability by repetitive transcranial magnetic stimulation. Clin Neurophysiol 2000;111(5):800–5. DOI: 10.1016/S1388-2457(99)00323-5
10. Berardelli A., Inghilleri M., Rothwell J.C. et al. Facilitation of muscle evoked responses after repetitive cortical stimulation in man. Exp Brain Res 1998;122(1):79–84. DOI: 10.1007/s002210050493
11. George M.S., Lisanby S.H., Avery D. et al. Daily left prefrontal transcranial magnetic stimulation therapy for major depressive disorder: a sham-controlled randomized trial. Arch Gen Psychiatry 2010;67(5):507–16. DOI: 10.1001/archgenpsychiatry.2010.46
12. George M.S., Wassermann E.M., Kimbrell T.A. et al. Mood improvement following daily left prefrontal repetitive transcranial magnetic stimulation in patients with depression: a placebo-controlled crossover trial. Am J Psychiatry 1997;154(12):1752–6. DOI: 10.1176/ajp.154.12.1752
13. O'Reardon J.P., Solvason H.B., Janicak P.G. et al. Efficacy and safety of transcranial magnetic stimulation in the acute treatment of major depression: a multisite randomized controlled trial. Biol Psychiatry 2007;62(11):1208–16. DOI: 10.1016/j.biopsych.2007.01.018
14. Yan J. FDA approves new option to treat major depression. Psychiatric News 2008;43(22):2–17. DOI: 10.1176/pn.43.22.0002*10.1176/pn.43.22.0002

15. Chung S.W., Hill A.T., Rogasch N.C. et al. Use of theta-burst stimulation in changing excitability of motor cortex: a systematic review and meta-analysis. *Neurosci Biobehav Rev* 2016;63:43–64. DOI: 10.1016/j.neubiorev.2016.01.008
16. Hoyer E.H., Celnik P.A.. Understanding and enhancing motor recovery after stroke using transcranial magnetic stimulation. *Restor Neurol Neurosci* 2011;29(6):395–409. DOI: 10.3233/RNN-2011-0611
17. Hummel F.C., Cohen L.G. Non-invasive brain stimulation: a new strategy to improve neurorehabilitation after stroke? *Lancet Neurol* 2006;5(8):708–12. DOI: 10.1016/S1474-4422(06)70525-7
18. He Y., Zhang Q., Ma T.T. et al. Effect of repetitive transcranial magnetic stimulation-assisted training on lower limb motor function in children with hemiplegic cerebral palsy. *BMC Pediatr* 2024;24(1):136. DOI: 10.1186/s12887-024-04605-5
19. Xie Y.-J., Chen Y., Tan H.-X. et al. Repetitive transcranial magnetic stimulation for lower extremity motor function in patients with stroke: a systematic review and network meta-analysis. *Neural Regeneration Research* 2021;16(6):1168–76. DOI: 10.4103/1673-5374.300341
20. Tarapore P.E., Picht T., Bulubas L. et al. Safety and tolerability of navigated TMS for preoperative mapping in neurosurgical patients. *Clin Neurophysiol* 2016;127(3):1895–900. DOI: 10.1016/j.clinph.2015.11.042
21. Kakuda W., Abo M., Kobayashi K. et al. Low-frequency rTMS combined with intensive occupational therapy for upper limb hemiparesis after brain tumour resection. *Brain Injury* 2010;24(12):1505–10. DOI: 10.3109/02699052.2010.523040
22. Barcia J.A., Sanz A., González-Hidalgo M. et al. rTMS stimulation to induce plastic changes at the language motor area in a patient with a left recidivant brain tumor affecting Broca's area. *Neurocase* 2012;18(2):132–8. DOI: 10.1080/13554794.2011.568500
23. O'Neal C.M., Stephens T.M., Briggs R.G. et al. Navigated transcranial magnetic stimulation following awake craniotomy for resection of glioma: description of two cases. *Surg Neurol Int* 2020;11:433. DOI: 10.25259/SNI_628_2020
24. Ille S., Kelm A., Schroeder A. et al. Navigated repetitive transcranial magnetic stimulation improves the outcome of postsurgical paresis in glioma patients – a randomized, double-blinded trial. *Brain Stimul* 2021;14(4):780–7. DOI: 10.1016/j.brs.2021.04.026
25. Poologaindran A., Profyris C., Young I.M. et al. Interventional neurorehabilitation for promoting functional recovery post-craniotomy: a proof-of-concept. *Sci Rep* 2022;12(1):3039. DOI: 10.1038/s41598-022-06766-8
26. Rossi S., Antal A., Bestmann S. et al. Safety and recommendations for TMS use in healthy subjects and patient populations, with updates on training, ethical and regulatory issues: Expert Guidelines. *Clin Neurophysiol* 2021;132(1):269–306. DOI: 10.1016/j.clinph.2020.10.003
27. Hausmann A., Kemmler G., Walpoth M. et al. No benefit derived from repetitive transcranial magnetic stimulation in depression: a prospective, single centre, randomised, double blind, sham controlled “add on” trial. *J Neurol Neurosurg Psychiatry* 2004;75(2):320–2.
28. Siddiqi S.H., Taylor S.F., Cooke D. et al. Distinct symptom-specific treatment targets for circuit-based neuromodulation. *Am J Psychiatry* 2020;177(5):435–46. DOI: 10.1176/appi.ajp.2019.19090915
29. Rosen A.C., Bhat J.V., Cardenas V.A. et al. Targeting location relates to treatment response in active but not sham rTMS stimulation. *Brain Stimul* 2021;14(3):703–9. DOI: 10.1016/j.brs.2021.04.010
30. Dadario N.B., Brahima B., Yeung J., Sughrue M.E. Reducing the cognitive footprint of brain tumor surgery. *Front Neurol* 2021;12:711646. DOI: 10.3389/fneur.2021.711646
31. Moreno-Ortega M., Kangarlu A., Lee S. et al. Parcel-guided rTMS for depression. *Translational Psychiatry* 2020;10(1):283. DOI: 10.1038/s41398-020-00970-8
32. Einstein E.H., Dadario N.B., Khilji H. et al. Transcranial magnetic stimulation for post-operative neurorehabilitation in neuro-oncology: a review of the literature and future directions. *J Neurooncol* 2022;157(3):435–43. DOI: 10.1007/s11060-022-03987-9

Вклад авторов

В.Х. Харбедия: анализ публикаций по теме статьи, сбор и обработка материала, написание текста статьи;
М.А. Капранова, Е.А. Саленко, А.А. Глазырина, Е.Е. Петряйкина, Э.В. Кумирова: анализ публикаций по теме статьи, редактирование текста статьи, научное консультирование.

Authors' contributions

V.Kh. Kharbediya: analysis of publications on the topic of the article, collection and processing of material, article writing;
M.A. Kapranova, E.A. Salenko, A.A. Glazyrina, E.E. Petryaykina, E.V. Kumirova: analysis of publications on the topic of the article, editing of the article, scientific consulting.

ORCID авторов / ORCID authors

В.Х. Харбедия / V.Kh. Kharbediya: <https://orcid.org/0000-0001-7574-335X>
А.А. Глазырина / A.A. Glazyrina: <https://orcid.org/0000-0002-2397-3484>
Е.Е. Петряйкина / E.E. Petryaykina: <https://orcid.org/0000-0002-8520-2378>
Э.В. Кумирова / E.V. Kumirova: <https://orcid.org/0000-0001-6125-2410>

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Финансирование. Работа выполнена без спонсорской поддержки.
Funding. The work was performed without external funding.

Статья поступила: 17.12.2024. **Принята к публикации:** 24.01.2025. **Опубликована онлайн:** 14.03.2025.
Article submitted: 17.12.2024. **Accepted for publication:** 24.01.2025. **Published online:** 14.03.2025.