



Глеб О.В.✉, Чернуха Т.Н., Лихачев С.А.

Республиканский научно-практический центр неврологии и нейрохирургии,
Минск, Беларусь

Возможности применения транскраниальной магнитной стимуляции при мигрени

Конфликт интересов: не заявлен.

Вклад авторов: Глеб О.В. – аналитический обзор литературы, формулирование выводов; Чернуха Т.Н. – обзор литературы, формулирование выводов, редактирование; Лихачев С.А. – формулирование выводов, редактирование.

Подана: 19.10.2023

Принята: 11.12.2023

Контакты: hlebovolha@gmail.com

Резюме

Данные некоторых исследований показывают, что транскраниальная магнитная стимуляция (ТМС) позволяет снижать количество дней мигрени в месяц, уменьшать интенсивность и продолжительность приступов мигрени в течение нескольких дней после применения ТМС, быстро купировать приступ мигрени и улучшать уровень качества жизни. Кроме того, ТМС безопасна и хорошо переносится, совместима с приемом фармакологической профилактической терапии при хронической мигрени. Однако отсутствие однородности результатов и данных о долгосрочной реальной эффективности приводит к тому, что результаты не предоставляют убедительных доказательств эффективности ТМС в лечении мигрени. В целях оптимального применения ТМС в клинической практике для лечения мигрени необходимы дальнейшие исследования, направленные на уточнение механизмов влияния данной процедуры на головной мозг.

Важной проблемой, препятствующей широкому клиническому применению ТМС при мигрени, является неполное знание механизмов действия ТМС при мигрени, касающееся как профилактического лечения, так и лечения острой фазы. Следовательно, необходимы проведение дальнейших рандомизированных плацебо-контролируемых исследований для выяснения патофизиологии мигрени, анализ безопасности длительного и частого применения ТМС. Также требуется изучение потенциального взаимодействия между ТМС и новыми доступными препаратами для лечения и предотвращения приступов мигрени. Актуальна разработка оптимальных параметров ритмической ТМС, количества сеансов, показаний для направления на данный вид лечения.

Ключевые слова: транскраниальная магнитная стимуляция, мигрень, параметры стимуляции, профилактическая терапия, купирование приступа



Hleb V.✉, Charnukha T., Likhachev S.

Republican Research and Clinical Center of Neurology and Neurosurgery, Minsk, Belarus

Possibilities of Using Transcranial Magnetic Stimulation for Migraine

Conflict of interest: nothing to declare.

Authors' contribution: Hleb V. – analytical review of the literature, formulation of conclusions; Charnukha T. – review of the literature, formulation of conclusions, editing; Likhachev S. – formulation of conclusions, editing.

Submitted: 19.10.2023

Accepted: 11.12.2023

Contacts: hlebvola@gmail.com

Abstract

Some studies show that transcranial magnetic stimulation (TMS) can reduce the number of migraine days per month, reduce the intensity and duration of migraine attacks within a few days after using TMS, quickly relieve a migraine attack, and improve quality of life. In addition, TMS is safe and well tolerated and is compatible with pharmacological preventive therapy for chronic migraine. However, the lack of uniformity of results and long-term real-world effectiveness data means that the results do not provide convincing evidence of the effectiveness of TMS in the treatment of migraine. Further research is needed to clarify the mechanisms of the effect of this procedure on the brain in order to optimally use TMS in clinical practice for the treatment of migraine.

An important problem preventing the widespread clinical use of TMS for migraine is incomplete knowledge of the mechanisms of action of TMS for migraine, regarding both preventive treatment and treatment of the acute phase. Therefore, further randomized placebo-controlled studies are needed to elucidate the pathophysiology of migraine, as well as to analyze the safety of long-term and frequent use of TMS. Potential interactions between TMS and new available drugs for the treatment and prevention of migraine attacks are also warranted. It is relevant to develop optimal parameters for rhythmic TMS, the number of sessions, and indications for referral to this type of treatment.

Keywords: transcranial magnetic stimulation, migraine, stimulation parameters, preventive therapy, attack relief

История транскраниальной магнитной стимуляции (ТМС) начинается с 1985 г., когда Энтони Баркер представил первый транскраниальный магнитный стимулятор [1]. Изначально ТМС использовалась с диагностической целью для оценки состояния кортикоспинального тракта с помощью определения времени центрального моторного проведения и характеристик вызванного моторного ответа [2]. В 1995 г. M.S. George впервые сообщил о применении ТМС в лечебных целях для терапии фармакорезистентной депрессии [3]. В настоящее время ТМС одобрена для применения в лечении ряда психических (депрессия, маниакальное расстройство, шизофрения, биполярное расстройство, паническое расстройство, посттравматическое стрессовое расстройство, злоупотребление психоактивными веществами)

и неврологических заболеваний (болезнь Паркинсона, мышечная дистония, эпилепсия, последствия инфаркта мозга и другие) [4].

Основой метода ТМС является узконаправленная стимуляция определенного участка головного мозга с использованием переменного магнитного поля, создаваемого электромагнитной индукцией электрического поля. Данное воздействие способно подавлять или активировать заданные участки коры головного мозга и базируется на открытии Фарадеем (1831 г.) закона о том, что «переменное магнитное поле индуцирует электрический ток в расположенном рядом проводнике, причем сила тока прямо пропорциональна частоте изменения магнитного поля» [5, 6].

ТМС может иметь одноимпульсный режим (проводится однократными стимулами) или парно-импульсный режим (проводится парными стимулами). В последние годы широко применяется новая технология – ритмическая ТМС (рТМС), при которой генерируется серия импульсов. Существуют два основных режима рТМС: низкочастотная (используется частота импульсов тока 1 Гц или ниже), которая вызывает снижение возбудимости нейронов коры головного мозга, и высокочастотная (применяется частота выше 1 Гц) – приводит, наоборот, к повышению возбудимости нейронов [7]. Другой переменной в стимуляции является интенсивность, выраженная в процентах от индивидуального моторного порога в состоянии покоя. рТМС может вызывать долгосрочные изменения в коре головного мозга [8].

Нейробиологические механизмы влияния ТМС могут быть объяснены деполяризацией мембраны корковых нейронов под воздействием индукции электрического поля, возникновением трансмембранного тока ионов и генерацией потенциала действия с последующей синаптической трансмиссией возбуждения на нейрональные сети, связанные со стимулируемой областью головного мозга. Так, по данным исследований, стимуляция дорсолатеральной префронтальной коры левого полушария с частотой 20 Гц изменяет уровень глутамата в коре больших полушарий головного мозга не только на стороне воздействия, но и на противоположной стороне [9].

ТМС – неинвазивный и достаточно безопасный метод лечения. Имеет небольшой перечень абсолютных противопоказаний, к которым относится наличие у пациента устройств, управляющих физиологическими функциями организма (имплантированный водитель ритма сердца, слуховой аппарат, электроды и инсулиновая помпа), в непосредственной близости от магнитного стимулятора [10]. Беременность относится к относительным противопоказаниям, так как результаты полученных в последние годы исследований свидетельствуют о безопасности ТМС в этот период с определенными ограничениями выполнения процедуры в III триместре беременности [11]. ТМС не рекомендуется проводить на фоне острого инфаркта мозга или тяжелой черепно-мозговой травмы в связи с повышением внутричерепного давления и возрастанием риска возникновения судорожного приступа во время сеанса. Не следует проводить рТМС на фоне тяжелых соматических заболеваний [12].

Наиболее тяжелой нежелательной реакцией на фоне применения рТМС является индуцированный судорожный приступ. В настоящее время в связи с установлением безопасных параметров использования рТМС сообщений о возникновении эпилептического приступа на фоне данного метода лечения нет. S. Rossi (2009) установил максимальное время трейна (непрерывной стимуляции) для каждой частоты и интенсивности и минимальную паузу между трейнами. Например, для частоты стимуляции с интенсивностью 100% от порога моторного ответа с частотой 5 Гц



максимальная продолжительность трейна – 10 секунд, а минимальная продолжительность паузы – 5 секунд [13]. По данным разных авторов, 5–10% пациентов отмечали болевые ощущения во время сеанса рТМС, что приводило к головным болям, которые быстро проходили самостоятельно или купировались аспирином или ибупрофеном. В результате проведения плацебо-контролируемых исследований безопасности рТМС достоверных изменений уровня артериального давления, частоты сердечных сокращений, параметров ЭЭГ, содержания гормонов в крови, каких-либо долгосрочных отрицательных эффектов ТМС не было выявлено [14].

С целью проведения плацебо-контролируемых исследований применения рТМС для создания условий имитации стимуляции в группе плацебо используется стратегия фиктивных стимуляций, при которой койл не индуцирует магнитное поле, однако производит характерные щелчки, также применяется неправильное расположение койла [15].

На протяжении нескольких лет ведутся исследования по применению ТМС в терапии эпизодической и хронической мигрени с аурой и без, а также воздействие на сопутствующие симптомы. Продолжается изучение механизмов лечебного воздействия ТМС на частоту и интенсивность мигренозной головной боли.

Патогенез развития мигрени сложен и до сих пор не до конца изучен. Кроме того, фармакологическая терапия для купирования приступов и профилактики мигрени иногда неэффективна и может повысить риск развития лекарственно-индуцированной головной боли. По этим причинам объектом исследования стали нефармакологические методы лечения. Обоснование использования ТМС для профилактики и предотвращения приступов мигрени заключается в способности ТМС влиять на возбудимость коры ниже и далеко за пределами места применения ТМС, оказывая соответствующее влияние на передачу сигналов в мозге. Примечательно, что магнитные импульсы могут ингибировать распространяющуюся корковую депрессию и связанную с ней таламокортикальную передачу сигналов, что согласуется с данными о том, что воздействие на некоторые области мозга с помощью ТМС может влиять на боль, тем самым блокируя приступ мигрени и способствуя уменьшению боли и частоты приступов мигрени [16].

Точный механизм терапевтического воздействия рТМС на пациентов с мигренью еще не установлен. В соответствии с данными экспериментальных исследований, магнитное поле, возникающее в результате действия ТМС на кору головного мозга, вызывает деполяризацию мембраны нервной клетки. Возникающий в нейроне потенциал действия распространяется по аксонам, а затем через синапсы активизирует окружающие нейроны разной модальности. Также ТМС воздействует на облегчение спраутинга, нейрогенез, оказывает модулирующее действие на регуляцию функций автономной нервной системы, реактивность мозговых сосудов, активность иммунной системы, вызывает торможение в ноцицептивных тригемино-таламических нейронах [17]. Таким образом, данный метод лечения является потенциально эффективным средством как для купирования приступов, так и для профилактики мигрени.

Еще в 2004 г. Brighina F. с соавторами исследовали анальгетический эффект при воздействии рТМС на префронтальную кору головного мозга. Предполагается, что левая префронтальная кора осуществляет активный контроль болевых ощущений путем модуляции корково-подкорковых трактов [18]. В этом исследовании

высокочастотная рТМС, стимулирующая левую дорсолатеральную префронтальную кору (ДЛПФК), имела большой эффект в лечении пациентов с хронической мигренью (ХМ). Также предполагается, что ДЛПФК и анатомически и физиологически связанная с ней лимбическая кора имеют чрезвычайное значение в патофизиологии многих хронических коморбидных состояний, таких как лекарственная зависимость, депрессия, биполярное расстройство и другие [19].

В двойном слепом рандомизированном исследовании, опубликованном в 2010 г. учеными Lipton R.B., Dodick D.W., Silberstein S.D. с соавторами, участвовало 164 пациента с мигренью (82 в основной группе и 82 в контрольной группе). Зоной воздействия ТМС при мигрени с аурой была затылочная кора. Было получено снижение интенсивности головной боли вплоть до полного купирования на 24 часа у 32% пациентов основной группы. В результате была подтверждена эффективность ТМС затылочных долей одиночными стимулами для купирования приступа мигрени, сопровождающегося зрительной аурой [9]. В 2014 г. по результатам данного исследования в США, а затем и в Великобритании было разработано портативное устройство, одобренное FDA (U.S. Food and Drug Administration – Управление по санитарному надзору за качеством пищевых продуктов и медикаментов США) для клинического применения пациентами в домашних условиях с целью предотвращения мигренозного приступа со зрительной аурой. Данное устройство производит короткие магнитные импульсы (несколько мс, 0,9 Тл) на затылочные доли в течение 30 секунд. Снижение боли в течение 2 часов наблюдалось у 39% пациентов основной группы и лишь у 16% пациентов контрольной группы [20]. Исследователи считают, что при мигрени с аурой ТМС над затылочной областью головного мозга препятствует развитию распространяющейся корковой депрессии, а также может модулировать активность таламуса и гипоталамуса [21].

Также в 2010 г. Fierro B. и соавторы опубликовали результаты исследования, показывающего, что высокочастотная стимуляция рТМС ДЛПФК восстанавливает возбудимость моторной коры и вызывает обезболивающий эффект при боли, вызванной капсаицином, что позволило предположить, что ДЛПФК играет роль в ингибировании ноцицептивной передачи [22].

В 2013 г. учеными Misra U.K., Kalita J. и Bhoi S.K. были опубликованы данные рандомизированного плацебо-контролируемого исследования, в результате которого было выявлено повышение уровня бета-эндорфина в плазме крови на фоне применения метода рТМС ДЛПФК зоны левого полушария в лечении мигрени, что коррелировало с достоверным уменьшением частоты мигренозных приступов, интенсивности болей, степени утраты трудоспособности пациентов. Исследование показало, что уровни бета-эндорфина в плазме пациентов с хронической мигренью были ниже, чем в контрольной группе. Три сеанса лечения рТМС привели к ремиссии мигрени и повышению уровня бета-эндорфина в плазме, что позволило предположить, что уменьшение симптомов мигрени после курса рТМС было связано с повышением уровня бета-эндорфина [23]. Однако в одной из статей, опубликованных этими же авторами в 2017 г., показано, что рТМС не оказала существенного влияния на снижение частоты головных болей. В основной и контрольной группах пациентов наблюдалось повышение уровня бета-эндорфинов, что привело к снижению выраженности и интенсивности головных болей. Таким образом, эти результаты позволяют предположить, что именно ДЛПФК, а не изменение уровня бета-эндорфинов,



является ключевым центром регуляции боли, который может служить терапевтической мишенью при мигрени [24].

В исследовании, опубликованном в 2016 г. ученым Bruggenjurgen B. с соавторами изучены механизмы воздействия высокочастотной рТМС (10 Гц, 600 последовательностей) на фронтальную область левого полушария головного мозга у пациентов с мигренью. По данным соматосенсорных вызванных потенциалов у пациентов после курса рТМС было установлено повышение габитуации (привыкания) реакции корковых нейронов, что способствует снижению болевого синдрома [25].

Также ученые установили, что рТМС может усилить долговременные пластические модификации, вызывая функциональную реорганизацию коры головного мозга. Даже одноимпульсная ТМС может задействовать множество сетей головного мозга, функционально связанных со зрительной системой, что может быть ответственно за ее эффекты при мигрени [2].

В одном из исследований было показано, что высокочастотная (20 Гц) рТМС над левой ДЛПФК у шести пациентов с ХМ по сравнению с пятью пациентами с имитацией рТМС оказалась эффективной для профилактики мигрени, включая частоту приступов, интенсивность приступа головной боли и количество принимаемых обезболивающих средств. Напротив, более низкая частота рТМС (10 Гц над левой ДЛПФК или 1 Гц рТМС над теменной областью) оказалась неэффективной [26].

По данным другого исследования, на фоне однократного сеанса высокочастотной рТМС (600 импульсов частотой 10 Гц) над левой первичной моторной корой (М1) снизилось количество дней с головной болью в месяц (около 3 дней), уменьшилась интенсивность приступов мигрени, улучшилось качество жизни пациентов с ХМ. Примечательно, что проведение пациентам трех таких сеансов не имело значительного преимущества по сравнению с одним сеансом [27].

По данным исследования, опубликованного в 2014 г. в журнале *Cefalalgia*, 8-недельный протокол высокочастотной рТМС над левой ДЛПФК у пациентов с ХМ был эффективен и безопасен, но уступал контрольной группе в плане уменьшения количества дней с головной болью. Таким образом, был сделан вывод, что стимуляция М1 с помощью рТМС может быть более многообещающей мишенью, чем ДЛПФК [28]. В двойном слепом рандомизированном клиническом исследовании в параллельных группах с использованием нейронавигационной ТМС, опубликованном в 2021 г., исследователи проводили процедуру 5 дней в неделю в течение 2 недель над левой М1 (600 импульсов при 70% моторного порога покоя, распределенных по 10 сериям с частотой 10 Гц и интервалом между сериями 60 секунд). Авторы обнаружили достоверное на протяжении одного месяца снижение интенсивности боли, частоты головной боли и степени утраты трудоспособности по причине мигрени в группе пациентов, получавших лечение рТМС [29].

Применение одноимпульсной ТМС также изучалось в качестве профилактического лечения. В многоцентровом проспективном исследовании 217 пациентам проводилась терапия одноимпульсной ТМС в течение 3 месяцев (4 импульса два раза в день). Было выявлено снижение частоты головной боли примерно на три дня по сравнению с исходным уровнем и по сравнению с плацебо, а также снижение частоты применения анальгетиков и степени утраты трудоспособности [30].

Исследования, опубликованные в 2017 г., показали, что рТМС может быть использована для лечения головной боли при ХМ с аурой, при этом зоной для стимуляции

была выбрана М1 [31]. Проведены исследования, которые показали, что рТМС можно использовать в качестве профилактического лечения мигрени, воздействуя на нейротрансмиттеры и снижая возбудимость коры головного мозга [32]. Доказано, что после 5 дней стимуляции рТМС длительность выраженного обезболивающего эффекта составляет около 1 месяца, что позволяет предположить, что повторная стимуляция приводит к более высокому и продолжительному эффекту [33].

В систематическом обзоре ученых Safiai N.I.M., Mohamad N.A., Basri H., опубликованном в 2021 г., проведена оценка эффективности, безопасности и переносимости высокочастотной рТМС, применяемой для профилактики мигрени [34]. На основании рандомизированного двойного слепого контролируемого исследования разработан протокол (стимуляция левой ДЛПФК в течение 5-ти сеансов) применения рТМС для профилактического лечения эпизодической головной боли при мигрени с аурой [35].

Основываясь на результатах метаанализа эффективности рТМС при лечении ХМ, опубликованного учеными из Китая в 2022 г., рТМС эффективна в профилактике развития повторных приступов мигрени, а стимуляция левой ДЛПФК является более эффективной, чем М1. Установлено, что поскольку у пациентов с мигренью наблюдается тенденция к гипервозбудимости клеток головного мозга или торможению дилатации коры, рТМС может улучшить возбудимость коры, стимулируя ДЛПФК и помогая регулировать нарушенные соединения болевых нейронных сетей для предотвращения мигрени. Данный метаанализ показал, что рТМС является эффективным подходом для уменьшения частоты приступов мигрени при стимуляции ДЛПФК. Однако рТМС не может быть предложена в качестве метода снижения уровня боли [36].

Одним из важнейших факторов, определяющих эффективность рТМС, является частота. Высокочастотная рТМС вызывает повышение возбудимости коры головного мозга, что может быть результатом ослабленного торможения внутрикорковых или нейронных связей, опосредованного гамма-аминомасляной кислотой (ГАМК), а не непосредственно вызванной повышенной возбудимостью. Основопологающим патофизиологическим фактором мигрени может быть низкая, а не высокая возбудимость коры головного мозга [37]. С этой точки зрения высокочастотная стимуляция является методом выбора для профилактического лечения мигрени.

При рТМС в кору головного мозга доставляются повторяющиеся серии магнитных импульсов, что позволяет сохранять пластический эффект в течение длительного времени после стимуляции. Так как пациенты с ХМ обычно обладают более высоким уровнем центральной возбудимости, то длительный эффект рТМС может быть для них полезен [38].

По данным некоторых исследований, уменьшение частоты приступов мигрени происходит при увеличении количества и интенсивности стимулов, что указывает на кумулятивный эффект стимулов ТМС, соответствующий принципам нейропластичности. Однако это не является абсолютным правилом, поскольку в некоторых клинических исследованиях имитация ТМС превосходила результаты в основной группе ТМС. Также наблюдается постоянная изменчивость количества сеансов (от одного до 12), общего количества импульсов и количества импульсов за сеанс (от 600 до более 20 000). Еще одним важным фактором является цель стимуляции. По данным некоторых исследований, ТМС кажется более эффективной при применении над М1, чем над ДЛПФК [39], в других исследованиях наоборот [40].



По данным изученных исследований, эффективность рТМС при лечении мигрени была предварительной и не до конца убедительной из-за неоднородности дизайна исследования стимуляции рТМС (включая частоту стимуляции, количество импульсов, интенсивность импульсов и количество сеансов, вариабельность критериев отбора пациентов, отсутствие однородности результатов и данных о долгосрочной эффективности лечения). Так, в большинстве доступных клинических исследований, в которых участвовали пациенты, резистентные к фармакологической терапии, преобладали женщины, число пациентов с мигренью с аурой было невысоким. В некоторых исследованиях в одну группу включались пациенты как с эпизодической, так и с хронической мигренью [41].

Данные некоторых исследований показывают, что ТМС позволяет снижать количество дней мигрени в месяц, уменьшать интенсивность и продолжительность приступов мигрени в течение нескольких дней после применения ТМС, быстро купировать приступ мигрени и улучшать уровень качества жизни. Кроме того, ТМС безопасна и хорошо переносится, совместима с приемом фармакологической профилактической терапии ХМ. Однако отсутствие однородности результатов и данных о долгосрочной реальной эффективности приводит к тому, что результаты не предоставляют убедительных доказательств эффективности ТМС в лечении мигрени. В целях оптимального применения ТМС в клинической практике для лечения мигрени необходимы дальнейшие исследования, направленные на уточнение механизмов влияния данной процедуры на головной мозг.

Важной проблемой, препятствующей широкому клиническому применению ТМС при мигрени, является неполное знание механизмов действия ТМС при мигрени, касающееся как профилактического лечения (в основном рТМС), так и лечения острой фазы (одноимпульсная ТМС). Считается, что повышенная возбудимость М1 и ДЛПФК играет важную роль в формировании боли. Кроме того, рТМС над данными областями головного мозга, по-видимому, задействует различные биохимические механизмы, связанные с контролем боли, включая плазменные бета-эндорфины, вазоактивные нейропептиды, преимущественно кальцитонин-ген-родственный пептид (CGRP), субстанция Р и нейрокинин А [21].

Следовательно, необходимы проведение дальнейших рандомизированных плацебо-контролируемых исследований для выяснения патофизиологии мигрени, анализ безопасности длительного и частого применения ТМС. Также требуется изучение потенциального взаимодействия между ТМС и новыми доступными препаратами для лечения и предотвращения приступов мигрени, включая моноклональные антитела к CGRP и его рецепторам. Актуальна разработка оптимальных параметров рТМС, количества сеансов, показаний для направления на данный вид лечения.

■ ЛИТЕРАТУРА/REFERENCES

1. Barker A., Jalinous R., Freeston I.L. (1985) Non-invasive magnetic stimulation of human motor cortex. *Lancet*, vol. I, pp. 1106–1109.
2. Nikitin S.S., Kurenkov A.L. (2003) *Magnetic stimulation in the diagnosis and treatment of diseases of the nervous system*. Moscow: Sashko. (in Russian).
3. Pascual-Leone A., Rubio B., Pallardó F., Catalá M.D. (1996) Rapid-rate transcranial magnetic stimulation of left dorsolateral prefrontal cortex in drug-resistant depression. *Lancet*, vol. 348 (9022), pp. 233–237.
4. Gershon A.A., Dannon P.N., Grunhaus L. (2003) Transcranial magnetic stimulation in the treatment of depression. *Am J Psychiatry*, vol. 160 (5), pp. 835–845.
5. Rossi S., Hallett M., Rossini P., et al. (2009) Safety of TMS Consensus Group. Clinical safety, ethical considerations, and application guidelines for the use of transcranial magnetic stimulation in clinical practice and research. *Clin. Neurophysiol.*, vol. 120(12), pp. 2008–2039.

6. Wassermann E.M., Lisanby S.H. (2011) Therapeutic application of repetitive transcranial magnetic stimulation: a review. *Clin. Neurophysiol.*, vol. 12, pp. 1367–1377.
7. Clark O., Mahjoub A., Nily O., Ann-Marie S., Saber J., Lagman-Bartolome A.M. (2022) Non-invasive neuromodulation in the acute treatment of migraine: a systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials. *Neurol. Sci.*, vol. 43 (1), pp. 153–165.
8. Nitsche M.A., Doemkes S., Karakose T., Antal A., Liebetanz D., Lang N., et al. (2007) Shaping the effects of transcranial direct current stimulation of the human motor cortex. *J. Neurophysiol.*, vol. 97, pp. 3109–17.
9. Pradhan S., Kirtan A., MacQueen G., et al. (2015) The effect of repetitive transcranial magnetic stimulation on dorsolateral prefrontal glutamate in youth with treatment-resistant depression. *BMC Proceedings*, vol. 9, p. 9.
10. Rossini P.M., Burke D., Chen R., et al. (2015) Non-invasive electrical and magnetic stimulation of the brain, spinal cord, roots and peripheral nerves: Basic principles and procedures for routine clinical and research application. An updated report from an I.F.C.N. Committee. *Clinical Neurophysiology*, vol. 126 (6), pp. 1071–1075.
11. Najib U., Horvath J.C. (2014) *Transcranial Magnetic Stimulation (TMS) Safety Considerations and Recommendations*. New York: Humana Press.
12. Chen R. (2000) Studies of human motor physiology with transcranial magnetic stimulation. *Muscle Nerve*, no 9, pp. 26–32.
13. Peinemann A., Reimer B., Löer C. et al. (2004) Long-lasting increase in corticospinal excitability after 1800 pulses of subthreshold 5 Hz repetitive TMS to the primary motor cortex. *Clin. Neurophysiol.*, vol. 115, no 7, pp. 1519–1526.
14. Lefaucheur J.P., André-Obadia N., Antal A. (2014) Evidence-based guidelines on the therapeutic use of repetitive transcranial magnetic stimulation (rTMS). Ethical considerations, and application guidelines for the use of transcranial magnetic stimulation in clinical practice and research. *Clin. Neurophysiol.*, vol. 120, no 12, pp. 2008–2039.
15. Gates J.R., Dhuna A., Pascual-Leone A. (1992) Lack of pathologic changes in human temporal lobes after transcranial magnetic stimulation. *Epilepsia*, vol. 33, no 3, pp. 504–508.
16. Blech B., Starling A.J. (2020) Noninvasive Neuromodulation in Migraine. *Current Pain and Headache Reports*, 24, p. 78.
17. Andreou A.P., Sprenger T., Goadsby P.J. (2013) Cortical modulation of thalamic function during cortical spreading depression – unraveling a new central mechanism involved in migraine aura. *J. Headache Pain*, vol. 14 (1), p. 16.
18. Brighina F., Piazza A., Vitello Aloisio A., Palermo A., Daniele O., et al. (2004) Repetitive TMS of the prefrontal cortex in the treatment of chronic migraine. *J. Neurol. Sci.*, vol. 227, pp. 67–71.
19. Lorenz J., Minoshima S., Casey K.L. (2003) Keeping pain out of mind: the role of the dorsolateral prefrontal cortex in pain modulation. *Brain*, vol. 126, pp. 1079–91.
20. Lipton R.B., Dodick D.W., Silberstein S.D., et al. (2010) Single-pulse transcranial magnetic stimulation for acute treatment of migraine with aura: A randomised, double-blind, parallel-group, sham-controlled trial. *Lancet Neurol.*, vol. 9 (4), pp. 373–380.
21. Zardouz S., Shi L., Leung A. (2016) A feasible repetitive transcranial magnetic stimulation clinical protocol in migraine prevention. *SAGE Open Medical Case Reports*, 4.
22. Fierro B., De Tommaso M., Giglia F., Giglia G., Palermo A., Brighina F. (2010) Repetitive transcranial magnetic stimulation (rTMS) of the dorsolateral prefrontal cortex (DLPFC) during capsaicin-induced pain: modulatory effects on motor cortex excitability. *Experimental Brain Research*, vol. 203 (1), pp. 31–38.
23. Misra U.K., Kalita J., Bhoi S.K. (2013) High-rate repetitive transcranial magnetic stimulation in migraine prophylaxis: A randomized, placebo-controlled study. *J. Neurol.*, vol. 260 (11), pp. 2793–2801.
24. Misra U.K., Kalita J., Tripathi G., Bhoi S.K. (2017) Role of β endorphin in pain relief following high-rate repetitive transcranial magnetic stimulation in migraine. *Brain Stimul.*, vol. 10, pp. 618–623.
25. Bruggenjurgen B., Bake T., Bhogal R., et al. (2016) Cost impact of a non-invasive, portable device for patient self-administration of chronic migraine in a UK National Health Service setting. *Springer Plus*, vol. 5, pp. 1249–1256.
26. Conforto A., Gonçalves A.L., Mercante J., Guendler V., Amaro Jr. E., et al. (2011) Effects of repetitive transcranial magnetic stimulation in chronic migraine: A pilot study. *Cephalalgia*, 31, p. 94.
27. Kalita J., Laskar S., Bhoi S.K., Misra U.K. (2016) Efficacy of single versus three sessions of high-rate repetitive transcranial magnetic stimulation in chronic migraine and tension-type headache. *Journal of Neurology*, vol. 263, pp. 2238–2246.
28. Conforto A.B., Amaro E., Gonçalves A.L., Mercante J.P., Guendler V.Z., Ferreira J.R., et al. (2014) Randomized, proof-of-principle clinical trial of active transcranial magnetic stimulation in chronic migraine. *Cephalalgia*, vol. 34, pp. 464–472.
29. Kumar A., Mattoo B., Bhatia R., Kumar S., Bhatia R. (2021) Neuronavigation based 10 sessions of repetitive transcranial magnetic stimulation therapy in chronic migraine: an exploratory study. *Neurological Sciences*, vol. 42, pp. 131–139.
30. Starling A.J., Tepper S.J., Marmura M.J., Shamim E.A., Robbins M.S., Hindiyyeh N., et al. (2018) A multicenter, prospective, single arm, open label, observational study of sTMS for migraine prevention (ESPOUSE Study). *Cephalalgia*, vol. 38, p. 1038.
31. Cortese F., Coppola G., Di Lenola D., et al. (2017) Excitability of the motor cortex in patients with migraine changes with the time elapsed from the last attack. *J. Headache Pain*, vol. 18 (1), p. 2.
32. Connell N.E., Marston L., Spencer S., et al. (2018) Non-invasive brain stimulation techniques for chronic pain. *Cochrane Database Syst. Rev.*, vol. 4.
33. Lan L.H., Zhang X.N., Li X.P., et al. (2017) The efficacy of transcranial magnetic stimulation on migraine: a meta-analysis of randomized controlled trials. *Journal of Headache and Pain*, vol. 18, p. 86.
34. Safai N.J.M., Mohamad N.A., Basri H., et al. (2021) High-frequency repetitive transcranial magnetic stimulation at dorsolateral prefrontal cortex for migraine prevention: A protocol for a systematic review of controlled trials. *PLoS One*, vol. 16 (6).
35. Nabil I.M.S., Amir N.A., Basri H., et al. (2020) Effectiveness and tolerability of repetitive transcranial magnetic stimulation for preventive treatment of episodic migraine: A single-centre, randomised, double-blind, sham-controlled phase 2 trial (Magnet-EM). *Trials*, vol. 21 (1), p. 923.
36. Jiugen Zhong, Wanting Lan, Yanqing Feng, et al. (2022) Efficacy of repetitive transcranial magnetic stimulation on chronic migraine: A meta-analysis. *Front. Neurol.*, vol. 13.
37. Teepker M., Hötzel J., Timmesfeld N., Reis J., Mylius V., Haag A., et al. (2010) Low-frequency rTMS of the vertex in the prophylactic treatment of migraine. *Cephalalgia*, vol. 30, pp. 137–144.
38. Chen W.T., Wang S.J., Fuh J.L., Lin C.P., Ko Y.C., Lin Y.Y. (2009) Pericatal normalization of visual cortex excitability in migraine: an MEG study. *Cephalalgia*, vol. 29, pp. 1202–1211.
39. Hulla R., Liegey-Dougall A. (2019) A systematic review of high frequency transcranial magnetic stimulation on motor cortex areas as a migraine preventive treatment. *Cephalalgia Reports*, vol. 2.
40. Mohamad Safai N.J., Amir N.A., Basri H., et al. (2020) Effectiveness and tolerability of repetitive transcranial magnetic stimulation for preventive treatment of episodic migraine: a single-centre, randomised, double-blind, 8 sham-controlled phase 2 trial (Magnet-EM). *Trials*, vol. 21, p. 923.
41. Misra U.K., Kalita J., Bhoi S.K. (2012) High frequency repetitive transcranial magnetic stimulation (rTMS) is effective in migraine prophylaxis: an open labeled study. *Neurological Research*, vol. 34, pp. 547–551.