

Значение диагностической транскраниальной магнитной стимуляции при проведении лучевой терапии

А.В. Карташев^{1,2*}, В.Ю. Чиркин³, Н.В. Ильин¹,
В.Б. Войтенков^{4,5}, Ю.Н. Виноградова¹

¹Российский научный центр радиологии и хирургических технологий
им. А.М. Гранова, г. Санкт-Петербург, Россия;

²Северо-Западный государственный медицинский университет
им. И.И. Мечникова, г. Санкт-Петербург, Россия;

³Национальный медицинский исследовательский центр
им. В.А. Алмазова, г. Санкт-Петербург, Россия;

⁴Детский научно-клинический центр инфекционных болезней
Федерального медико-биологического агентства, г. Санкт-Петербург, Россия;

⁵Академия постдипломного образования Федерального
научно-клинического центра Федерального медико-биологического
агентства, г. Москва, Россия

Реферат

Актуальность. Транскраниальная магнитная стимуляция — неинвазивный безболезненный метод, позволяющий стимулировать кору головного мозга при помощи коротких магнитных импульсов. Полученную в результате исследований информацию можно в дальнейшем использовать для объективной оценки проводимой терапии.

Цель. Оценка достоверности методики транскраниальной магнитной стимуляции в качестве инструмента нейрофизиологического мониторинга у пациентов со злокачественными опухолями головного мозга.

Материал и методы исследования. Объект исследования — две группы: пациенты с крупноочаговым солитарным поражением центральной нервной системы (глиома) ($n=20$), медиана возраста $49,5 \pm 5,3$ (39; 60) лет, проходившие курс лучевой терапии, и группа сравнения ($n=16$), медиана возраста $48,5 \pm 6,3$ (43,0; 58,8) лет, состоящая из неврологически здоровых людей. Статистически значимые различия по возрасту между исследованными группами отсутствовали. Всем пациентам проводили диагностическую транскраниальную магнитную стимуляцию до и после терапии. При проведении сравнений между двумя группами использовали критерий Манна–Уитни. Значение $p < 0,05$ считали статистически достоверным.

Результаты. При транскраниальной магнитной стимуляции у пациентов со злокачественными новообразованиями головного мозга признаки нарушения проведения по центральным двигательным путям регистрируют в 50% случаев, всего же признаки нарушения проведения всех степеней выраженности по центральным моторным путям обнаруживают в 90% случаев. Проведение диагностической транскраниальной магнитной стимуляции по одноимпульсному протоколу даёт возможность прогнозирования дальнейшего течения периода восстановления. Применение транскраниальной магнитной стимуляции в динамике позволило выявить улучшение проведения по центральным моторным путям у пациентов со злокачественными новообразованиями головного мозга. Полученные статистически значимые различия позволяют сделать заключение, что транскраниальную магнитную стимуляцию можно применять для объективной оценки состояния моторных путей у пациентов на фоне нейроонкологических заболеваний.

Вывод. Диагностическая транскраниальная магнитная стимуляция применима при крупноочаговом солитарном поражении центральной нервной системы, поскольку позволяет оценивать состояние моторных путей и функциональную активность головного мозга на разных этапах этого состояния.

*Для переписки: arxiator@mail.ru

Поступила 28.09.2021; принята в печать 11.10.2021;
опубликована: 12.04.2022.

© Эко-Вектор, 2022. Все права защищены.

*For correspondence: arxiator@mail.ru

Submitted 28.09.2021; accepted 11.10.2021;
published: 12.04.2022.

© Eco-Vector, 2022. All rights reserved.

Ключевые слова: лучевая терапия, транскраниальная магнитная стимуляция, опухоли головного мозга, магнитный койл, нейродегенеративные заболевания, глиома, вызванные моторные ответы.

Для цитирования: Карташев А.В., Чиркин В.Ю., Ильин Н.В., Войтенков В.Б., Виноградова Ю.Н. Значение диагностической транскраниальной магнитной стимуляции при проведении лучевой терапии. *Казанский мед. ж.* 2022;103(2):202–210. DOI: 10.17816/KMJ2022-202.

ORIGINAL STUDY | DOI: 10.17816/KMJ2022-202

Significance of diagnostic transcranial magnetic stimulation during radiotherapy

A.V. Kartashev^{1,2*}, V.Yu. Chirkin³, N.V. Ilyin, V.B. Voitenkov^{4,5}, Yu.N. Vinogradova¹

¹Russian Scientific Center of Radiology and Surgical Technologies named after A.M. Granov, St. Petersburg, Russia;

²Northwestern State Medical University named after I.I. Mechnikov, St. Petersburg, Russia;

³National Medical Research Center named after V.A. Almazov, St. Petersburg, Russia;

⁴Pediatric Research and Clinical Center for Infectious Diseases of the Federal Medical and Biological Agency, St. Petersburg, Russia

⁵Academy of Postgraduate Education of Federal Scientific Research Center of the Federal Medical and Biological Agency, Moscow, Russia

Abstract

Background. Transcranial magnetic stimulation is a non-invasive, painless method that stimulates the cerebral cortex using short magnetic pulses. The information obtained as a result of the research can be further used for an objective assessment of the therapy.

Aim. Evaluation the reliability of transcranial magnetic stimulation technique as a neurophysiological monitoring tool in patients with malignant brain tumors.

Material and methods. There were two groups as a study objects: patients with large-focal solitary lesions of the central nervous system (glioma) who underwent radiotherapy (n=20), median age 49.5±5.3 (39; 60) years, and a comparison group of neurologically healthy individuals (n=16), median age 48.5±6.3 (43.0; 58.8) years. There were no statistically significant age differences between the studied groups. All patients underwent diagnostic transcranial magnetic stimulation before and after therapy. The Mann–Whitney test was used to make comparisons between the two groups. A p value <0.05 was considered statistically significant.

Results. During transcranial magnetic stimulation in patients with malignant brain neoplasms, signs of impaired conduction along the central motor pathways were recorded in 50% of cases, and in total, signs of impaired conduction of all degrees of severity along the central motor pathway were detected in 90% of cases. Carrying out diagnostic transcranial magnetic stimulation according to a single-pulse protocol makes it possible to predict the further course of the recovery period. The use of transcranial magnetic stimulation in dynamics revealed an improvement in conduction along the central motor pathways in patients with malignant brain neoplasms. The obtained statistically significant differences allow us to conclude that transcranial magnetic stimulation can be used for an objective assessment of the state of the motor pathways in patients with neurooncological diseases.

Conclusion. Diagnostic transcranial magnetic stimulation is applicable in large-focal solitary lesions of the central nervous system, since it allows assessing the state of the motor pathways and the functional activity of the brain at different stages of this condition.

Keywords: radiotherapy, transcranial magnetic stimulation, brain tumors, magnetic coil, neurodegenerative diseases, glioma, evoked motor responses.

For citation: Kartashev AV, Chirkin VYu, Ilyin NV, Voitenkov VB, Vinogradova YuN. Significance of diagnostic transcranial magnetic stimulation during radiotherapy. *Kazan Medical Journal.* 2022;103(2):202–210. DOI: 10.17816/KMJ2022-202.

Актуальность

Транскраниальная магнитная стимуляция (ТМС) — нейрофизиологический метод исследования, основанный на принципе электромагнитной индукции. Данный метод заключается в стимуляции нейронов и последующей регистрации вызванных ей ответов посредством электронейромиографии [1, 2]. ТМС была интегрирована в медицинскую практику как диа-

гностический инструмент в середине 1980-х годов, и к настоящему времени данный неинвазивный метод исследования проводящих двигательных систем головного и спинного мозга широко применяют в клинической неврологии и нейрофизиологии, в определённой степени благодаря безболезненности и относительной методической простоте [3–5]. Кроме того, ТМС обладает широкими диагностическими и тера-

Таблица 1. Инфографическая характеристика экспериментального исследования

Выборка исследования	В группе глиом обследованы 20 пациентов. Средний возраст группы составил 49,5 (39; 60) года. По полу группа распределилась на 10 мужчин и 10 женщин. У всех пациентов был установленный гистологически диагноз глиомы больших полушарий головного мозга: у 8 — анапластическая астроцитома, у 1 — анапластическая олигодендроглиома, у 11 — глиобластома. Локализация опухолей: в правом полушарии — у 9, в левом — у 11 пациентов. 16 человек составили первую группу сравнения (неврологически здоровые, транскраниальную магнитную стимуляцию проводили в рамках скринингового исследования), средний возраст группы 48,5 (43,0; 58,8) года
Сроки проведения исследования	Срок проведения исследования с момента появления первых жалоб составлял от 63 до 164 сут, в среднем 110 сут. Все пациенты прошли хирургическое лечение, полного удаления глиомы не было ни в одном случае; средний срок проведения исследования от момента оперативного лечения составлял 30 дней, минимальный — 22 дня. Исследование у всех пациентов группы глиом проводили в рамках подготовки к проведению лучевой терапии. Терапия заключалась в лучевом лечении (разовая очаговая доза 3 Гр, суммарная очаговая доза 51 Гр)
Технологическая база исследования	Использовали транскраниальный магнитный стимулятор Нейро-МСД (Нейрософт, Россия), стандартный кольцевой койл 90 мм в диаметре. Для регистрации применяли миограф Нейро-МВП 4 (Нейрософт, Россия), чашечковые поверхностные электроды. Регистрировали вызванные моторные ответы (ВМО) с рук (<i>m. abductor pollicis brevis</i>), их порог, латентность, амплитуду и форму ВМО, затем рассчитывалось время центрального моторного проведения

певтическими возможностями, что обусловило её применение при широком спектре неврологических заболеваний и патологических состояний у детей и взрослых [6–8].

Цель

Целью исследования было определение достоверности методики ТМС в качестве инструмента нейрофизиологического мониторинга у пациентов со злокачественными первичными опухолями головного мозга.

Материалы и методы исследования

Тип исследования — экспериментальное. Работа одобрена этическим комитетом Российского научного центра радиологии и хирургических технологий им. А.М. Гранова, протокол №04-19 от 22.05.2019. Всего с помощью ТМС были обследованы 20 пациентов: взрослые с крупноочаговым солитарным поражением центральной нервной системы (глиомой), проходившие курс лучевой терапии в Российском научном центре им. А.М. Гранова (г. Санкт-Петербург, Россия) в 2018–2020 гг.

Инфографическая характеристика базы и методов исследования представлена в табл. 1.

Полученные результаты сравнивали между группами. Статистический анализ проводили с помощью пакета программ Statistica для Windows. Для оценки демографических показателей групп использовали описательные статистические методики. Для нормально распределённых параметров применяли *t*-критерий Стьюдента, в случае неправильного распределения — тест Манна–Уитни. Вели-

чину $p < 0,05$ расценивали как статистически достоверную. Группу сравнения составляли 20 взрослых (средний возраст $45 \pm 4,3$ года) неврологически здоровых лиц. Работа выполнена в соответствии с этическими нормами и одобрена локальным этическим комитетом.

Для оценки состояния кортикоспинального тракта магнитную стимуляцию проводили на корковом и сегментарном уровнях [1]. Магнитный койл располагали на голове исследуемого таким образом, чтобы регистрируемый потенциал имел наибольшую амплитуду: для оценки коркового вызванного моторного ответа (ВМО) — в проекции церебральных моторных зон, для анализа сегментарных ВМО — над шейным и поясничным утолщениями спинного мозга соответственно.

При исследовании верхних конечностей центр стандартного кольцевого койла помещали над зоной *vertex*, то есть над точкой пересечения линии, проведённой сагиттально, и линии, соединяющей слуховые проходы; а двойной койл («восьмёрку») — на 5–7 см латеральнее *vertex* на контралатеральной стороне по отношению к регистрирующим электродам. При сегментарной магнитной стимуляции койл располагали на уровне позвонка C_{VII} (при этом внешний диаметр нижней части койла находится на уровне остистого отростка C_{VII}) или на 1 см латеральнее на стороне регистрирующих электродов. При исследовании нижних конечностей кольцевой койл находился на 2 см кпереди и на 4 см контралатеральнее точки регистрации над зоной *vertex*; а двойной койл — над зоной *vertex*. Для получения ВМО на уровне

сегмента койл располагали на уровне позвонков L_{III} и L_{IV} при его латеральном смещении на 2–3 см ипсилатерально по отношению к регистрирующим электродам [3].

Активация нейрональных структур головного мозга при стимуляции койлом по локализации в существенной степени совпала с активацией аналогичных церебральных структур при выполнении произвольного движения. Индуцированная ТМС активация нейрональных структур, непосредственно располагающихся в проекции койла, как и удалённых корковых зон [ипси- и контралатеральной премоторной коры, дополнительной моторной коры, ипсилатеральной соматосенсорной коры, мозжечка (преимущественно контралатерально по отношению к катушке), таламуса и билатерально хвостатых ядер и акустической коры], в значительной степени совпадала с активацией этих же нейрональных структур при выполнении произвольного движения, но, как правило, меньше по своей пространственной протяжённости. Большая длительность индуцированной активации была связана, вероятно, с циркуляцией возбуждения по мультисинаптическим нейрональным сетям, постепенно затухающего после окончания процедуры ТМС. Магнитная индукция при применении стандартных койлов зависит от расстояния от их поверхности.

При выполнении диагностической ТМС наиболее часто регистрирующие стандартные накожные электроды накладывали на *m. abductor pollicis brevis dexter*, *m. abductor pollicis brevis sinister*, *m. tibialis anterior dexter*, *m. tibialis anterior sinister*, *m. abductor hallucis dexter*, *m. abductor hallucis sinister*. Техника наложения электродов «belly-tendon» — аналогично общепринятой процедуре отведения М-ответа при стимуляционной электромиографии.

При исследовании проводящих эфферентных систем верхних конечностей активный электрод располагают на средней части брюшка короткой мышцы, приводящей большой палец (проекция двигательной точки *m. abductor pollicis brevis*), а референтный — в области проксимальной фаланги большого пальца. При ТМС проводящих путей нижней конечности активный электрод накладывают на среднюю часть брюшка большеберцовой мышцы, а референтный — в проекции её прикрепления к кости (проекция двигательной точки *m. tibialis anterior*). Также с этой целью использовали сухожилия *m. abductor hallucis*. При наложении периферических регистрирующих электродов использовали костные ориентиры: головка головчатой кости на уровне запястья,

передняя поверхность первого пястно-фалангового сустава. Обязательным было наложение заземляющего электрода, в частности при исследовании верхней конечности его помещали на середину ладони. Во время процедуры ТМС пациенты находились в расслабленном состоянии.

Перед использованием электроды обрабатывали ватой, смоченной в 70% этиловом спирте. После их установки проверяли качество наложения электродов. Это осуществляли с помощью имеющейся функции проверки импеданса у всех современных электронейромиографов как отечественного, так и зарубежного производства. При чрезмерном импедансе проводили дополнительное смачивание регистрирующего электрода электропроводной жидкостью (изотоническим раствором натрия хлорида).

Алгоритм проведения диагностической ТМС представлен на рис. 1.

ВМО, полученные при стимуляции коры головного мозга, называются *кортикальными* (корковыми), полученные же при стимуляции спинного мозга — *сегментарными*; при стимуляции периферических структур получают *периферические* ВМО.

Величина времени центрального моторного проведения (ВЦМП) получается из времени, необходимого для деполяризации корковых мотонейронов, синаптической задержки и деполяризации кортикоспинальных нейронов, проведения импульса по кортикоспинальному тракту, синаптической задержки и деполяризации на уровне α -мотонейронов и времени, требующегося для проведения от корешка в области места возбуждения на уровне нейрональных сегментарных систем.

При каждом варианте магнитной стимуляции параметры моторного ответа можно определять в двух состояниях: на фоне покоя исследуемой мышцы и при небольшом произвольном напряжении (тест фасилитации), при котором происходит активация спинальных α -мотонейронов и облегчается возникновение моторного ответа. Считают, что важную роль в реализации феномена фасилитации играют спинальные мотонейроны. При развитии произвольного усилия до 10% максимального в основном активизируются нейрональные структуры спинного мозга, при большем же усилии корковые и спинальные механизмы начинают играть равную роль.

С практической точки зрения важно учитывать, что полученный при фасилитации ВМО неустойчив по амплитуде и имеет более короткую латентность и более высокую амплитуду, чем индуцированный потенциал в покое. Таким

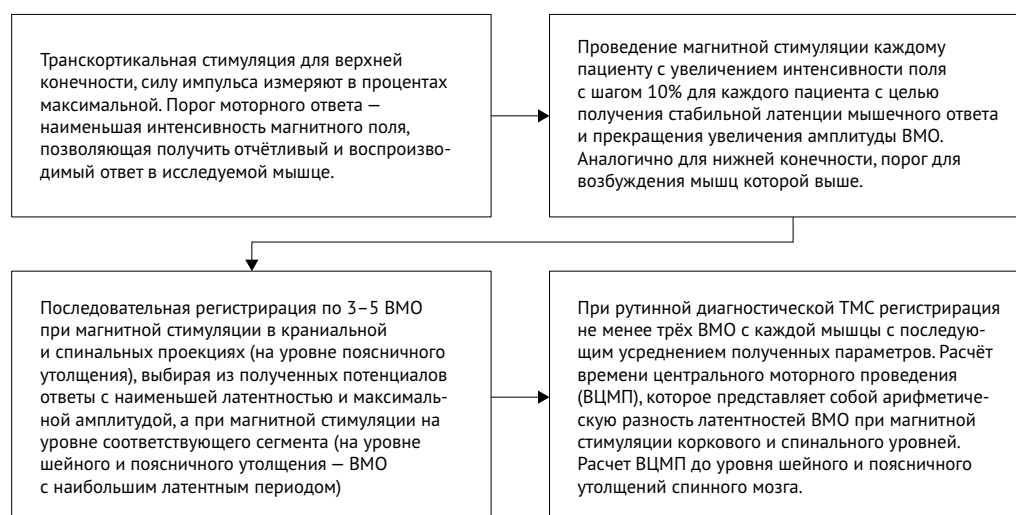


Рис. 1. Алгоритм проведения диагностической транскраниальной магнитной стимуляции (ТМС); ВМО — вызванный моторный ответ

Таблица 2. Показатели транскраниальной магнитной стимуляции у пациентов основной группы и группы сравнения

Показатели	Группа глиом (n=20)	Группа сравнения (взрослые) (n=16)
Латентность вызванных моторных ответов, мс		
Правая рука	23,34±3,3	21,41±1,74
Левая рука	21,89±1,43	20,94±2,53
Амплитуда вызванных моторных ответов, мВ		
Правая рука	1,36±1,12	5,43±2,05
Левая рука	1,84±1,62	3,25±2,01
Время центрального моторного проведения, мс		
Правая рука	10,13±3,91	7,95±0,7
Левая рука	8,75±1,15	7,67±1,01

образом, нельзя сравнивать ВМО в покое, зарегистрированный на одной стороне тела, с ВМО, полученным с применением фасилитации, на другой стороне, поскольку истинного состояния асимметрии проведения данные вызванные потенциалы не отражают.

Результаты и обсуждение

Полученные при первом исследовании показатели приведены в табл. 2.

Достоверных различий между группами не обнаружено ($p > 0,05$).

Результаты исследования в динамике приведены в табл. 3.

У пациентов с глиомами после проведённого лучевого лечения была несомненная тенденция к укорочению латентностей корковых ВМО, двустороннему повышению их амплитуд,

уменьшению ВЦМП с двух сторон и снижению выраженности асимметрии латентностей и ВЦМП между сторонами. По показателям амплитуды ВМО слева во 2-й серии исследований произошло достоверное их повышение.

Наблюдавшиеся в группе пациентов с глиомами изменения параметров ТМС (укорочение латентностей ВМО и уменьшение асимметрии ВЦМП), а также повышение функциональной активности мотонейронов коры (увеличение амплитуд корковых ВМО с двух сторон) могут быть обусловлены положительным эффектом химиолучевой терапии: снижением выраженности отёка мозга, уменьшением объёма плюск-ткани и наступившим в результате улучшением проведения по моторным путям. У единственной пациентки, у которой не было данной положительной нейрофизиологической динамики, не зарегистрировано также и клинического улучшения.

ТМС применяют до начала лучевой терапии, в процессе и после её проведения, с целью оценки сохранности моторных путей, картирования моторной коры, исследования функционального состояния мотонейронов. Известно, что применение диагностической ТМС при метастатическом поражении головного мозга снижает дозу облучения гиппокампа, равно как и ограничивать поражение моторной коры [9]. Это снижение дозы достигает 18% [10]. При применении ТМС в предоперационном периоде (лучевое лечение) при глиомах головного мозга доза снижается на 14% [11]. Положительные результаты получены также от подобного комбинирования методов при лечении метастазов в головной мозг с помощью гамма-ножа [12, 13].

Таблица 3. Показатели транскраниальной магнитной стимуляции (ТКСМ) в динамике

Показатели	Показатели ТКСМ (1-я серия, группа глиом) (n=20)	Показатели ТКСМ (2-я серия, группа глиом) (n=20)
Латентность ВМО справа, мс	23,34±3,3	22,9±1,16
Латентность ВМО слева, мс	21,89±1,43	21,9±1,12
Амплитуда ВМО справа, мВ	1,36±1,12	2,92±1,03
Амплитуда ВМО слева, мВ	1,84±1,62	5,07±1,2*
ВЦМП справа, мс	10,13±3,91	10,09±2,41
ВЦМП слева, мс	8,75±1,15	9,02±1,03
Асимметрия латентностей, мс	3,3±1,1	1,9±0,9
Асимметрия амплитуд, мВ	1,85±0,48	2,47±0,93
Асимметрия ВЦМП, мс	3,45±0,9	2,73±0,86

Примечание: *различие достоверно по сравнению с 1-й серией исследований ($p=0,048$); ВМО — вызванный моторный ответ; ВЦМП — время центрального моторного проведения.

Для оценки сохранности моторных путей можно оценивать латентности кортикальных и сегментарных ВМО, а также ВЦМП. Изменения их в ходе лечения рассматривают как положительные при уменьшении ВЦМП и укорочении латентностей. Также для этих целей оценивают амплитуду ВМО: её повышение рассматривают как признаки положительной нейрофизиологической динамики.

Для оценки функциональной активности мотонейронов исследуют порог ВМО: чем он ниже, тем активность выше [14]. Соответственно в ходе лучевой терапии понижение порога ВМО будет признаком положительной нейрофизиологической динамики.

Получаемые ВМО меняются соответственно стадии полушарного процесса и его объёму. Нет прямой зависимости от размеров очага и степени нарушения проведения вследствие большой вариабельности строения пирамидных путей и нейропластичности, то есть на этапе поздней реконвалесценции вследствие пластических адаптивных изменений кортикальный ВМО может обладать более «нормальными» параметрами (амплитуда, латентность, порог, форма), чем в остром периоде.

При крупных полушарных новообразованиях головного мозга возможны значительное снижение амплитуды и удлинение латентности кортикального ВМО на поражённой стороне при нормальных показателях сегментарного ВМО и полностью нормальных показателях и кортикального, и сегментарного ВМО ипсилатерально. В первую очередь получаемые при проведении ТМС данные меняются в зависимости от локализации и распространённости патологического процесса. В некоторых случаях крупная полушарная опухоль практически

не изменяет параметры ВМО и ВЦМП, а расположенная в зоне моторной коры может существенно деформировать форму ВМО и снижать его амплитуду. Период молчания при опухолях полушарной локализации в большей части случаев удлиняется в ипсилатеральном полушарии, что отражает повышение в нём процессов центрального торможения [14].

При анализе каждого конкретного клинического случая выраженные отклонения от нормы (полифазия коркового ВМО, асимметрия ВЦМП более 3 мс, удлинение латентности кортикального ВМО) отмечают у 20% пациентов с глиомами. Признаки средней степени выраженности замедления проведения по кортико-моторному пути (дисперсность коркового ВМО, асимметрия ВЦМП 2 мс, выраженный перепад амплитуд коркового и сегментарного ВМО) возникают в 30% случаев, признаки умеренной дисфункции проведения в виде асимметрии ВЦМП 1 мс, умеренной дисперсности коркового ВМО, перепада амплитуд средней степени выраженности — у 40% пациентов. Форма кортикального ВМО у пациентов с глиомами изменена в 80% случаев.

Таким образом, при проведении ТМС у пациентов со злокачественными новообразованиями головного мозга признаки нарушения проведения по центральным двигательным путям регистрируют в 50% случаев, всего же признаки нарушения проведения всех степеней выраженности по центральным моторным путям обнаруживают в 90% случаев.

При применении ТМС в послеоперационном периоде у пациентов со злокачественными новообразованиями головного мозга также регистрируют близкие к норме параметры латентности и амплитуды кортикальных ВМО,

Таблица 4. Нейрофизиологические паттерны проведения по моторным путям [4, 14]

Нейрофизиологические паттерны	Наличие коркового и сегментарного ВМО расценивают как признаки сохранности проведения по моторным путям, неполного поражения. У всех пациентов с этим паттерном в дальнейшем происходит восстановление движений
	Наличие только сегментарного ВМО при полном отсутствии коркового — нейрофизиологический аналог полного блока проведения
	Отсутствие как коркового, так и сегментарного ВМО ниже места поражения прогностически неблагоприятно в отношении восстановления проведения

Примечание: ВМО — вызванный моторный ответ.

при этом часто форма приобретает полиморфный характер [14]. Проведение диагностической ТМС по одноимпульсному протоколу даёт возможность прогнозирования дальнейшего течения периода восстановления. В табл. 4 приведены три ключевых нейрофизиологических паттерна.

Всем людям с сохранными кортикальными ВМО, пусть даже они непостоянны и сомнительны, впоследствии удаётся добиться улучшения движений. Факт регистрации второго паттерна, а именно отсутствия кортикального ВМО при сохранности сегментарного, аналогично не расценивается как однозначный признак полного нарушения проведения по моторному пути. В дальнейшем происходящая активизация нейропластичности с перестройкой моторных карт, а также синаптогенеза и нейрогенеза может приводить к восстановлению проведения [4, 15].

Степень выраженности регистрируемых изменений различна. Наличие изменений латентности ВМО и удлинения/выраженной асимметрии ВЦМП, как правило, бывает признаком более распространённого процесса.

Выводы

1. Диагностическая транскраниальная магнитная стимуляция служит дополнительной нейрофизиологической методикой в диагностике поражения головного мозга. Методика позволяет оценить динамику проведения по моторным путям на фоне радиотерапевтического лечения.

2. Диагностическую транскраниальную магнитную стимуляцию можно применять для объективной оценки состояния моторных путей у пациентов на фоне нейроонкологических заболеваний.

Участие авторов. Ю.Н.В., В.Ю.Ч. и Н.В.И. — сбор и анализ литературных данных; В.Б.В. — методологическая обработка собственных материалов исследования; А.В.К. — анализ литературных и собственных данных, руководство работой.

Источник финансирования. Исследование выполнено в рамках госзадания №37.8-2021

№121040200139-1. Разработка функционально-адаптивной радиохирургии опухолей головного мозга путём применения методики функциональной диагностики зон топического представительства скелетных мышц.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов по представленной статье.

ЛИТЕРАТУРА

1. Rossini PM, Burke D, Chen R, Cohen LG, Daskalakis Z, Di Iorio R, Di Lazzaro V, Ferreri F, Fitzgerald PB, George MS, Hallett M, Lefaucheur JP, Langguth B, Matsumoto H, Miniussi C, Nitsche MA, Pascual-Leone A, Paulus W, Rossi S, Rothwell JC, Siebner HR, Uga-wa Y, Walsh V, Ziemann U. 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. *Clin Neurophysiol.* 2015;126(6):1071–1107. DOI: 10.1016/j.clinph.2015.02.001.
2. Dobek CE. Music modulation of pain perception and pain-related activity in the brain, brain stem, and spinal cord: A functional magnetic resonance imaging study. *J Pain.* 2010;15(10):1057–1062. DOI: 10.1016/j.jpain.2014.07.006.
3. Никитин С.С., Куренков А.Л. *Магнитная стимуляция в диагностике и лечении болезней нервной системы.* Руководство для врачей. М: САШКО; 2003. 378 с. [Nikitin SS, Kurenkov AL. Magnitnaya stimulyatsiya v diagnostike i lechenii bolezney nervnoy sistemy. Rukovodstvo dlya vrachev. (Magnetic stimulation in the diagnosis and treatment of diseases of the nervous system. A guide for doctors.) Moscow: SASHKO; 2003. 378 p. (In Russ.)] DOI: 10.17816/PTORS4433-40.
4. Войтенков В.Б., Скрипченко Н.В., Климин А.В., Малы Ю. Транскраниальная магнитная стимуляция как диагностическая и терапевтическая методика. *Неврологический журнал.* 2015;20(5):4–13. [Voytenkov VB, Skripchenko NV, Klimkin AV, Mally Ju. Transcranial magnetic stimulation as a diagnostic and therapeutic tool. *Neurological journal.* 2015;20(5):4–13. (In Russ.)]
5. Najib U, Horvath JC. *Transcranial magnetic stimulation (TMS) safety considerations and recommendations.* New York: Humana Press; 2014. 156 p. DOI: 10.1007/978-1-4939-0879-02.
6. Rossi S, Hallett M, Rossini PM, Pascual-Leone A. The safety of TMS Consensus Group. Safety, ethical considerations, and application guidelines for the use of transcranial magnetic stimulation in clinical practice and research. *Clin Neurophysiol.* 2009;120(12):2008–2039. DOI: 10.1007/978-3-319-54918-74.

7. Eryılmaz G, Sayar GH, Özten E, Gül IG, Yorbik Ö, Işiten N, Bağcı E. Follow-up study of children whose mothers were treated with transcranial magnetic stimulation during pregnancy: Preliminary results. *Neuromodulation*. 2015;18(4):255–260. DOI: 10.1111/ner.12231.

8. Pridmore S, Turnier-Shea Y, Rybak M, Pridmore W. Transcranial Magnetic Stimulation (TMS) during pregnancy: a fetal risk factor. *Australas Psychiatry*. 2021;29(2):226–229. DOI: 10.1177/1039856221992636.

9. Dzierma Y, Schuermann M, Melchior P, Nuesken F, Oertel J, Rube C, Hendrix P. Optimizing adjuvant stereotactic radiotherapy of motor-eloquent brain metastases: Sparing the nTMS-defined motor cortex and the hippocampus. *Front Oncol*. 2021;11:628007. DOI: 10.3389/fonc.2021.628007.

10. Schwendner MJ, Sollmann N, Diehl CD, Oechsner M, Meyer B, Krieg SM, Combs SE. The role of navigated transcranial magnetic stimulation motor mapping in adjuvant radiotherapy planning in patients with supratentorial brain metastases. *Front Oncol*. 2018;8:424. DOI: 10.3389/fonc.2018.00424.

11. Diehl CD, Schwendner MJ, Sollmann N, Oechsner M, Meyer B, Combs SE, Krieg SM. Application of presurgical navigated transcranial magnetic stimulation motor mapping for adjuvant radiotherapy planning

in patients with high-grade gliomas. *Radiother Oncol*. 2019;138:30–37. DOI: 10.1016/j.radonc.2019.04.029.

12. Islam M, Cooray G, Benmakhlouf H, Hatiboglu M, Sinclair G. Integrating navigated transcranial magnetic stimulation motor mapping in hypofractionated and single-dose gamma knife radiosurgery: A two-patient case series and a review of literature. *Surg Neurol Int*. 2020;11:29. DOI: 10.25259/SNI_406_2019.

13. Tokarev AS, Rak VA, Sinkin MV, Evdokimova OL, Stepanov VN, Koynash GV, Krieg SM, Krylov VV. Appliance of navigated transcranial magnetic stimulation in radiosurgery for brain metastases. *J Clin Neurophysiol*. 2020;37(1):50–55. DOI: 10.1097/WNP.0000000000000621.

14. Карташев А.В., Войтенков В.Б., Киселёва Л.Н. Транскраниальная магнитная стимуляция в диагностике глиом головного мозга. *Вопросы онкологии*. 2013;59(2):22–26. [Kartashev AV, Voitenkov VB, Kiseleva LN. Transcranial magnetic stimulation in the diagnosis of cerebral gliomas. *Voprosy onkologii*. 2013;59(2):22–26. (In Russ.)]

15. Ekusheva EV, Vendrova MI, Danilov AB, Vein AM. The contributions of the right and left hemispheres of the brain to the polymorphism and heterogeneity of pyramidal syndrome. *Neurosci Behav Physiol*. 2005;35(3):229–234. DOI: 10.1007/s11055-005-0047-8.

Сведения об авторах

Карташев Артём Владимирович, канд. мед. наук, врач-радиотерапевт, ст. науч. сотр., отдел лучевых и комбинированных методов лечения, ФГБУ «Российский научный центр радиологии и хирургических технологий им. академика А.М. Гранова» Минздрава России; доц., каф. лучевой диагностики и лучевой терапии, ФГБОУ ВО «Северо-Западный государственный медицинский университет им. И.И. Мечникова» Минздрава России; arxiator@mail.ru; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6714-6413>

Чиркин Владислав Юрьевич, канд. мед. наук, врач-нейрохирург, Национальный медицинский исследовательский центр им. В.А. Алмазова; 9831766@mail.ru; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0610-1131>

Ильин Николай Васильевич, докт. мед. наук, врач-радиотерапевт, ФГБУ «Российский научный центр радиологии и хирургических технологий им. академика А.М. Гранова» Минздрава России; ilyin_prof@mail.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8422-0689>

Войтенков Владислав Борисович, канд. мед. наук, зав., отделение функциональной диагностики, ФГБУ «Детский научно-клинический центр инфекционных болезней ФМБА России»; доц., каф. нервных болезней и нейрореабилитации Академии постдипломного образования ФГБУ ФНКЦ ФМБА России; vlad203@inbox.ru; ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0448-7402>

Виноградова Юлия Николаевна, докт. мед. наук, врач-радиотерапевт, рук., отд. лучевых и комбинированных методов лечения; доц., каф. радиологии, хирургии и онкологии ФГБУ «Российский научный центр радиологии и хирургических технологий им. академика А.М. Гранова» Минздрава России; winogradova68@mail.ru; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0938-5213>

Author details

Artem V. Kartashev, M.D., Cand. Sci. (Med.), Radiotherapist, Senior Researcher, Depart. of Radiation and Combined Methods of Treatment, Russian Scientific Center of Radiology and Surgical Technologies named after Academician A.M. Granova of the Ministry of Health of Russia; Assoc. Prof., Depart. of Radiation Diagnostics and Radiation Therapy, I.I. Mechnikov Northwestern State Medical University of the Ministry of Health of Russia; arxiator@mail.ru; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6714-6413>

Vladislav Yu. Chirkin, M.D., Cand. Sci. (Med.), Neurosurgeon, V.A. Almazov National Medical Research Center; 9831766@mail.ru; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0610-1131>

Nikolaj V. Il'in, M.D., D. Sci. (Med.), Prof., Depart. of Radiation and Combined Methods of Treatment, Russian Scientific Center of Radiology and Surgical Technologies named after Academician A.M. Granova of the Ministry of Health of Russia; ilyin_prof@mail.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8422-0689>

Vladislav B. Voitenkov, M.D., Cand. Sci. (Med.), Head, Depart. of Functional Diagnostics, FSBI Children's Scientific and Clinical Center of Infectious Diseases of the FMBA of Russia; Assoc. Prof., Depart. of Nervous Diseases

and Neurorehabilitation, Academy of Postgraduate Education of the FMBA; vlad203@inbox.ru; ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0448-7402>

Yuliya N. Vinogradova, M.D., Doct. Sci. (Med.), Radiotherapist, Head, Depart. of Radiation and Combined Methods of Treatment; Assoc. Prof., Depart. of Radiology, Surgery and Oncology, Federal State Budgetary Institution Russian Scientific Center of Radiology and Surgical Technologies named after academician A.M. Granov; winogradova68@mail.ru; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0938-5213>