

Применение диффузионно-тензорной томографии с трактографией для оценки пирамидной системы у пациентов с высокоактивным рассеянным склерозом

Пешкин А.Н., Тония Г.Т., Степанова Е.А., Лиждвой В.Ю., Котов С.В.

ГБУЗ МО «Московский областной научно-исследовательский клинический институт им. М.Ф. Владимирского», Москва
Россия, 129110, Москва, ул. Щепкина, 61/2

Цель исследования — изучение состояния пирамидного тракта у пациентов с высокоактивным рассеянным склерозом (ВАРС) в период переключения терапии в связи с неоптимальным ответом на лечение с препаратов, изменяющих течение РС (ПИТРС), первой линии на вторую линию терапии.

Материал и методы. Обследованы 24 пациента с ВАРС. В зависимости от выраженности нарушений со стороны пирамидной функциональной системы (ПФС) по EDSS пациенты были разделены на две группы: 1-я группа — 17 пациентов, у которых оценка EDSS составила 0–2,5 балла, 2-я группа — 7 пациентов с оценкой EDSS ≥ 3 баллов. Всем выполнена МРТ головного мозга по стандартному протоколу. Диффузионно-тензорные изображения (ДТИ) были обработаны с использованием программного обеспечения DTI FiberTrak.

Результаты. Отмечено уменьшение объема пирамидного тракта у пациентов 2-й группы ($p < 0,001$), обнаружена асимметрия показателя, у ряда пациентов — уменьшение объема на клинически интактной стороне, что может свидетельствовать о визуально не выявляемых признаках поражения пирамидного тракта. Была отмечена отчетливая тенденция к снижению фракционной анизотропии и уменьшению длины пирамидного тракта по мере нарастания пирамидного дефицита ($p < 0,001$). Обнаружены отрицательные корреляции между показателями неврологического дефицита и объемом и длиной пирамидного тракта (Rho Спирмена = $-0,5246$; $p < 0,001$), а также прямая корреляция длительности течения РС с измеряемым коэффициентом диффузии и обратная — с фракционной анизотропией (R Пирсона = $-0,290$, $p = 0,039$).

Заключение. Выявленное уменьшение показателей объема и длины пирамидного тракта, повышение измеряемого коэффициента диффузии, асимметрия этих показателей, корреляции с уровнем пирамидной недостаточности, EDSS и длительностью течения РС, очевидно, могут послужить дополнительными критериями оценки динамики заболевания и эффективности проводимой терапии.

Ключевые слова: высокоактивный рассеянный склероз; пирамидная функциональная система; пирамидный тракт; объем; длина; измеряемый коэффициент диффузии.

Контакты: Сергей Викторович Котов; kotovsv@yandex.ru

Для ссылки: Пешкин АН, Тония ГТ, Степанова ЕА, Лиждвой ВЮ, Котов СВ. Применение диффузионно-тензорной томографии с трактографией для оценки пирамидной системы у пациентов с высокоактивным рассеянным склерозом. Неврология, нейропсихиатрия, психосоматика. 2024;16(3):31–37. DOI: 10.14412/2074-2711-2024-3-31-37

Diffusion tensor tomography with tractography in assessment of the pyramidal system in patients with highly active multiple sclerosis
Peshkin A.N., Toniya G.T., Stepanova E.A., Lizhdvoi V.Yu., Kotov S.V.
M.F. Vladimírsky Moscow Regional Research Clinical Institute, Moscow
61/2, Shchepkina St., Moscow 129110, Russia

Objective: to study the pyramidal tract in patients with highly active multiple sclerosis (HAMS) during treatment switching from first-line MS therapy to second-line therapy due to suboptimal response.

Material and methods. 24 patients with HAMS were analyzed. Depending on the severity of pyramidal functional system (PFS) impairment according to EDSS, patients were divided into 2 groups; group 1 — 17 patients with an EDSS score of 0–2.5 points, group 2 — 7 patients with an EDSS score of ≥ 3 points. All patients underwent MRI of the brain according to the standard protocol. The diffusion tensor images (DTI) were processed using the DTI FiberTrak software.

Results. The volume of the pyramidal tract was decreased in patients in group 2 ($p < 0.001$), asymmetry of the indicator was noted, in several patients a decrease in volume on the clinically intact side, which may indicate visually undetectable signs of damage of pyramidal tract. There was a clear tendency for a decrease in fractional anisotropy and a decrease in pyramidal tract length with increasing pyramidal deficit ($p < 0.001$). Negative correlations were found between indicators of neurological deficit and pyramidal tract volume and length (Spearman's $Rho = -0.5246$; $p < 0.001$) and a direct correlation between duration of MS and apparent diffusion coefficient (ADC) and inversely — with fractional anisotropy (Pearson's $R = -0.290$; $p = 0.039$).

Conclusion. The observed decrease in pyramidal tract volume and length, increase in ADC, asymmetry of these indicators, correlations with the degree of pyramidal insufficiency, EDSS and duration of MS can obviously serve as additional criteria for evaluation of disease dynamics and efficacy of therapy.

Keywords: highly active multiple sclerosis; pyramidal functional system; pyramidal tract; volume; length; apparent diffusion coefficient.

Contact: Sergey Viktorovich Kotov; kotovsv@yandex.ru

For reference: Peshkin AN, Toniya GT, Stepanova EA, Lizhdoi VYu, Kotov SV. Diffusion tensor tomography with tractography in assessment of the pyramidal system in patients with highly active multiple sclerosis. *Nevrologiya, neiropsikhiatriya, psikhosomatika = Neurology, Neuropsychiatry, Psychosomatics.* 2024;16(3):31–37. DOI: 10.14412/2074-2711-2024-3-31-37

Рассеянный склероз (РС) является наиболее распространенным хроническим аутоиммунным заболеванием центральной нервной системы (ЦНС), поражающим лиц трудоспособного и фертильного возраста. Социальная значимость проблемы РС заключается в том, что он является ведущей причиной неврологической инвалидизации лиц молодого и среднего возраста.

Одно из важных клинических проявлений РС – наличие симптомов повреждения белого вещества (БВ) головного и спинного мозга, пирамидных, спиноталамических, зрительных и прочих трактов. Диагностика РС до настоящего времени остается трудной задачей в связи с многообразием клинических проявлений, различиями в течении заболевания и отсутствием дающих однозначный ответ диагностических тестов. Среди неинвазивных методов диагностики первое место занимает магнитно-резонансная томография (МРТ), позволяющая выявить очаги поражения БВ и оценить степень повреждения головного и спинного мозга [1, 2]. Следует отметить, что выраженность клинических проявлений РС у разных пациентов значительно варьирует – от незначительных функциональных нарушений до тяжелой инвалидизации, причем исследования с применением различных методов функциональной МРТ позволили заключить, что инвалидизация при РС обусловлена нарушением не только структурных, но и функциональных связей в веществе мозга вследствие неадекватной ремиелинизации в местах повреждения миелина и развивающейся нейродегенерации [3, 4].

Количественная оценка повреждения БВ при РС имеет большое значение для диагностики, определения распространенности и степени поражения вещества головного и спинного мозга, оценки прогрессирования и эффективности проводимой терапии [5–7]. Отмечено, что выявляемые при МРТ локальные повреждения БВ в очагах воспаления недостаточно четко коррелируют с клинической картиной и степенью инвалидизации по Расширенной шкале статуса инвалидизации (Expanded Disability Status Scale, EDSS). Одновременно появляется все больше сообщений, указывающих на диффузный характер поражения БВ при РС, наличие изменений в нормальном на вид БВ, что позволяет исследователям говорить о РС как об олигодендропатии, подчеркивая единство процессов воспаления и нейродегенерации [8–10].

В настоящее время для изучения проводников БВ применяется диффузионно-тензорная МРТ с трактографией, основанная на измерении диффузии молекул воды в проводниках мозга. В результате проведенных исследований были выявлены локальные изменения в проводниках головного и спинного мозга у больных РС, несмотря

на то что наличие очагов РС затрудняло проведение этих работ, это обуславливало поиск наиболее адекватных методических подходов к построению трактов [11–13]. Полученные данные позволили судить о нарушениях структурной и функциональной коннективности мозга при РС, обнаружены определенные корреляции между показателями фракционной анизотропии в различных областях мозга и изменениями в оценке функциональных систем по EDSS. Особенно важным является изучение этих показателей у пациентов с высокоактивным течением РС (ВАРС) [14].

Целью нашего исследования было изучение состояния пирамидного тракта у пациентов с ВАРС в период переключения терапии в связи с неоптимальным ответом на лечение с препаратов, изменяющих течение РС (ПИТРС), первой линии на вторую линию терапии.

Материал и методы. Исследование носило проспективный наблюдательный характер, проведено на базе Московского областного Центра рассеянного склероза при МОНКИ им. М.Ф. Владимирского. Протокол исследования был одобрен независимым комитетом по этике МОНКИ им. М.Ф. Владимирского (протокол №8 от 13.06.2022). Все пациенты, проходившие обследование и принимавшие участие в данном исследовании, подписали информированное согласие.

В исследование были включены 24 пациента (7 мужчин и 17 женщин в возрасте от 23 до 56 лет, средний возраст – $38,4 \pm 10,3$ года). Длительность заболевания находилась в пределах от 6 мес до 13 лет (в среднем – $5,6 \pm 3,7$ года). У одной пациентки диагностирован быстро прогрессирующий РС (БПРС), у 19 – ВАРС, у четырех – вторично-прогрессирующий РС с обострениями (ВПРС). Поскольку при переводе больных с ПИТРС первой линии на ПИТРС второй линии процесс отмывки не требовался, исследование проводилось в течение 1–2 мес, в период после отмены препарата первой линии до старта терапии препаратом второй линии.

Оценку неврологических нарушений проводили с использованием шкалы EDSS [15].

В зависимости от выраженности нарушений со стороны пирамидной функциональной системы (ПФС) пациенты были разделены на две группы. В 1-ю группу вошли 17 пациентов, у которых оценка ПФС составила 0–2 балла, EDSS – 1–2,5 балла, во 2-ю группу – семь пациентов с оценкой ПФС ≥ 3 баллов, EDSS ≥ 3 баллов. Контрольную группу составили пять пациентов с заболеваниями периферической нервной системы, которым было назначено МРТ-исследование для исключения сопутствующей патологии ЦНС.

Всем пациентам выполнена МРТ головного мозга по стандартному протоколу. Исследование проводилось на МР-томографе Philips Achieva 3,0 T (Philips, Нидерланды) с использованием радиочастотной катушки для головного мозга. Диффузионно-тензорные изображения (ДТИ) получены однократно при следующих параметрах сканирования: разрешение $2,5 \times 2,5 \times 2,5$ мм³; область обзора – 120 мм; TR = 2758; TE = 84; 48 срезов; 15 направлений с b-фактором 800 мм²/с. В качестве анатомического ориентира для последующего совмещения с данными ДИ получены T1-взвешенные изображения (T1-ВИ) с инверсией восстановления (TE = 3,5, TR = 7,9, с изотропным вокселем $1 \times 1 \times 1$ мм).

Полученные ДТИ были обработаны посредством программного обеспечения DTI FiberTrak. Области интереса (regions of interest, ROI) для полуавтоматического построения пирамидных трактов установлены на одинаковом уровне справа и слева: ROI(1) – в проекции заднего бедра внутренней капсулы, ROI(2) – на уровне олив ипсилатерально. При отслеживании волокон использовались стандартные параметры: минимальная фракционная анизотропия (FA) – 0,15; максимальное изменение угла – 27°; минимальная длина волокна – 10 мм. Измерение количественных показателей: объема пучка (V), длины пучка в области исследования (L), FA, измеряемого коэффициента диффузии (ADC) – проводилось автоматически посредством программного обеспечения DTI FiberTrak.

Статистическую обработку материала проводили с использованием пакета программ StatPlus Pro 7.6.5.0. Количественные данные представлены в виде средних значений и стандартного отклонения ($M \pm \sigma$), порядковые данные – в виде медианы и квартилей (Me [25-й; 75-й перцентили]). Учитывая небольшие объемы выборок, нормальность распределения оценивали при помощи критерия Шапиро–Уилка. При анализе количественных данных для сравнения показателей трех независимых выборок применяли однофакторный дисперсионный анализ ANOVA с поправкой Бонферрони (уровень значимости $p < 0,0167$). Для сравнения бинарных показателей использовали критерий χ^2 . Для оценки взаимосвязи количественных переменных использовали коэффициент корреляции Пирсона R, порядковых переменных – коэффициенты ранговой корреляции Спирмена (Rho) и Кендалла (Tau).

Результаты. Пациенты, включенные в исследование, сами отмечали ухудшение состояния, и у них были выявлены клинические признаки прогрессирования РС в течение предшествующего года в виде нарастания пирамидной симптоматики, сенсорных нарушений, атаксии, появления тазовых нарушений. Выявлена отрицательная динамика в виде появления новых гиперинтенсивных на T2-ВИ очагов (20 пациентов) и активных очагов, накапливающих гадолиний (семь пациентов). Полученные клинические данные, свидетельствующие о неэффективности терапии ПИТРС первой

линии в течение предшествующего года, и данные МРТ подтвердили необходимость эскалации на вторую линию ПИТРС. У пациентки с БПРС, ранее не получавшей терапию ПИТРС, было зарегистрировано два обострения с нарастанием инвалидизации на 1 балл EDSS и более при каждом обострении, подтвержденные данными МРТ головы и шеи, с наличием очагов в стратегических зонах (заднее бедро левой внутренней капсулы головного мозга, левый боковой канатик спинного мозга), угрожавших нарастанием инвалидизации. У девяти из обследованных пациентов в ROI были визуализированы гиперинтенсивные на T2-ВИ очаги (у двоих – накопление гадолиния на T1-ВИ), свидетельствующие о поражении пирамидного тракта.

Демографические показатели пациентов, вошедших в исследование, представлены в табл. 1. Существенных различий по половому составу, возрасту и длительности течения РС между пациентами 1-й и 2-й групп не выявлено. Статистически значимо группы различались по типу течения: в 1-й группе преобладал ВАРС, во 2-й – ВПРС ($\chi^2=4,881$; $p=0,028$). Также различались оценка по EDSS ($p < 0,001$) и оценка ПФС ($p < 0,001$).

Результаты диффузионно-тензорного исследования пирамидного тракта на протяжении от передних двух третей заднего бедра внутренней капсулы до варолиева моста на уровне олив (ROI) представлены в табл. 2. У пациентов 1-й группы измеряемые показатели были близки к данным контрольной группы, за исключением длины пирамидного тракта, где было отмечено статистически значимое снижение данного показателя. У пациентов 2-й группы, напротив, отмечены статистически значимые отличия от данных контрольной группы, за исключением объема пирамидного тракта (с учетом поправки Бонферрони). Хотя по всем показателям отмечено ухудшение данных у пациентов 2-й группы по сравнению как с данными 1-й группы, так и с контролем (уменьшение объема пирамидного тракта, снижение показателя FA, повышение значения ADC, уменьшение длины пирамидного тракта), статистически значимые различия между пациентами 1-й и 2-й групп зарегистрированы только по объему пирамидного тракта, что, вероятно, объясняется малым объемом выборки.

Таблица 1. Клинико-демографические показатели обследованных пациентов

Table 1. Clinical and demographic parameters of patients

Показатель	Все обследованные (n=24)	1-я группа (n=17)	2-я группа (n=7)
Пол, М/Ж	7/17	6/11	1/6
Возраст, годы, $M \pm \sigma$	38,4 \pm 10,3	37,6 \pm 9,6	39,8 \pm 11,5
Длительность заболевания, годы, $M \pm \sigma$	5,6 \pm 3,7	5,6 \pm 4,1	5,5 \pm 3,0
Тип течения РС:			
БПРС	1	1	–
ВАРС	19	15	4
ВПРС	4	1	3
EDSS, баллы, Me [25-й; 75-й перцентили]	2,0 [1,5; 3,5]	1,5 [1,5; 2,0]	4,5 [3,5; 5,5]
Нарушения со стороны ПФС, баллы, Me [25-й; 75-й перцентили]	1,0 [1,0; 3,0]	1,0 [0,0; 1,0]	3,0 [3,0; 3,0]

В качестве иллюстрации приводим результаты обследования пациентов 1-й и 2-й групп (рис. 1, 2), при этом продемонстрировано снижение объема пирамидного тракта и возрастание ADC при прогрессировании пирамидной недостаточности.

Для определения взаимосвязи между переменными был проведен корреляционный анализ. Учитывая категори-

Таблица 2. Показатели диффузионно-тензорного исследования пирамидного тракта у пациентов с РС

Table 2. Indicators of the diffusion tensor imaging (DTI) of the pyramidal tract in patients with MS

Показатель	1-я группа (n=17)	2-я группа (n=7)	Контроль (n=5)
V, мм ³	7414±1490	5650±1828	7252±1025 <i>p</i> _{1-к} =0,543 <i>p</i> _{2-к} =0,018
FA	0,515±0,031	0,504±0,016	0,524±0,009 <i>p</i> _{1-к} =0,045 <i>p</i> _{2-к} <0,001
ADC, 10 ⁻³ мм ² /с	0,826±0,052	0,857±0,065	0,807±0,02 <i>p</i> _{1-к} =0,574 <i>p</i> _{2-к} <0,01
L, мм	123,5±12,4	116,4±4,7	133,5±7,1 <i>p</i> _{1-к} =0,001 <i>p</i> _{2-к} <0,001

Примечание. Показатели статистической значимости различий: *p*₁₋₂ – между 1-й и 2-й группами; *p*_{1-к} – между 1-й и контрольной группами; *p*_{2-к} – между 2-й и контрольной группами. Жирным шрифтом обозначены статистически значимые различия.

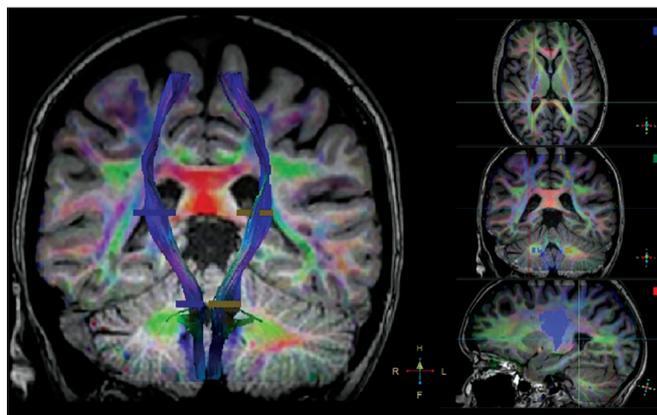


Рис. 1. ДТИ пациентки Г., 25 лет.

Диагноз: ВАРС, ремиссия. EDSS – 1 балл. Нарушения со стороны ПФС – 1 балл. Объем пирамидного тракта: $d = 10\,473\text{ мм}^3$, $s = 10\,198\text{ мм}^3$. ADC: $d=0,75$, $s=0,77$

Fig. 1. DTI of patient G., 25 years old.

Diagnosis: HAMS, remission. EDSS – 1 point. Pyramidal functional system impairment – 1 point. Volume of the pyramidal tract: $d=10,473\text{ мм}^3$, $s=10,198\text{ мм}^3$. ADC: $d=0.75$, $s=0.77$

альный характер переменных EDSS и ПФС, были использованы ранговые коэффициенты Спирмена и Кендалла, для выявления взаимосвязи между количественными переменными использовали коэффициент Пирсона, данные представлены в табл. 3.

Как видно из приведенных данных, обнаружена обратная корреляция между выраженностью неврологического дефицита (по данным EDSS и ПФС) и объемом и длиной пирамидного тракта. Обнаружено, что при увеличении длительности течения заболевания возрастало значение ADC и снижался показатель FA.

Мы оценили диагностическую значимость асимметрии показателей диффузионно-тензорной МРТ у всех обследованных пациентов с РС (n=24). Выявлено статистически значимое различие в числе лиц с асимметрией объема правого и левого пирамидных трактов на 20% и более между больными РС и контрольной группой ($\chi^2=5,934$; $p=0,015$), при этом у пациентов с РС отмечены корреляции между выраженностью неврологического дефекта по EDSS и ПФС и наличием асимметрии объемов пирамидных трактов ($Rho=0,403$; $p=0,018$ и $Rho=0,274$; $p=0,03$ соответственно).

При сравнении числа лиц, у которых показатель FA выходил за пределы 95% доверительного интервала (ДИ), обнаружено статистически значимое различие между больными РС и контрольной группой ($\chi^2=5,587$; $p=0,019$). При сравнении числа лиц, у которых показатель ADC выходил за пределы 95% ДИ, обнаружено статистически значимое различие между больными РС и контрольной группой ($\chi^2=6,0$; $p=0,015$). При сравнении числа лиц, у которых показатель длины пирамидного тракта выходил за пределы 95% ДИ, обнаружено статистически значимое различие между больными РС и контрольной группой ($\chi^2=4,196$; $p=0,041$). Существенных корреляций этих показателей в группе больных РС с EDSS и ПФС не выявлено.

Обсуждение. В результате проведенного исследования было обнаружено, что диффузионно-тензорная МРТ с тра-

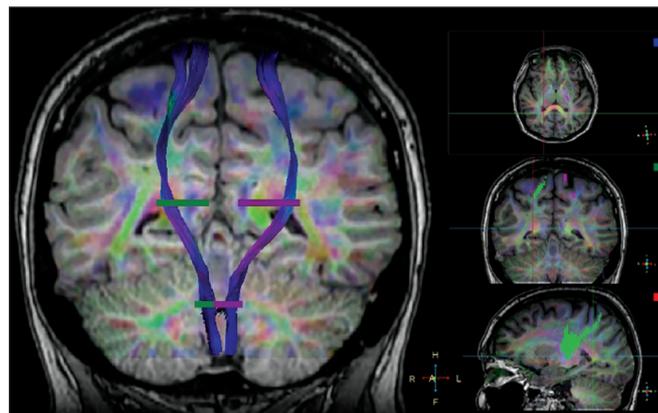


Рис. 2. ДТИ пациентки М., 48 лет.

Диагноз: ВАРС, ремиссия. EDSS – 3,5 балла. Нарушения со стороны ПФС – 3 балла. Объем пирамидного тракта: $d=2350\text{ мм}^3$, $s=2519\text{ мм}^3$. ADC: $d=0,8$, $s=0,79$

Fig. 2. DTI of patient M., 48 years old.

Diagnosis: HAMS, remission. EDSS – 3.5 points. Pyramidal functional system impairment – 3 points. Volume of the pyramidal tract: $d=2350\text{ мм}^3$, $s=2519\text{ мм}^3$. ADC: $d=0.8$, $s=0.79$

Цветные рисунки к этой статье представлены на сайте журнала: npr.ima-press.net

ктографией позволила получить дополнительные данные о состоянии пирамидного тракта у пациентов с РС по сравнению с традиционно применяемыми режимами МРТ.

Отмечено снижение объема пирамидного тракта у пациентов с клиническими признаками его поражения, при этом обнаружена не только асимметрия данного показателя, но и его снижение на клинически интактной стороне, что косвенно может свидетельствовать о визуально не выявляемых признаках поражения пирамидного тракта.

Была отмечена отчетливая тенденция к снижению показателя FA, увеличению значения ADC и снижению длины пирамидного тракта в ROI по мере нарастания пирамидного дефицита. Обнаружены отрицательные корреляции показателей неврологического дефицита с объемом и длиной пирамидного тракта, а также прямая корреляция длительности течения РС с ADC и обратная – с FA.

Отмечено статистически значимое увеличение числа асимметричных показателей длины и объема, FA и ADC у больных РС по сравнению с контролем, что также может расцениваться как признак поражения пирамидного тракта. При этом ADC и FA были изменены не только на стороне более выраженного дефекта пирамидной системы, но и на противоположной стороне, что позволяет констатировать наличие не визуализируемых в режимах T1-ВИ и T2-ВИ очагов повреждения БВ у обследованных пациентов. Сходные с нашими данные получены Н. Larassati и соавт. [16], выявившими снижение FA и повышение ADC не только в зонах пораженного БВ, но и в областях с визуально интактным БВ. Авторами была обнаружена прямая корреляция ADC и обратная корреляция FA с показателем EDSS; такие корреляции отметили также М. Elsayed и соавт. [17].

D. Valdes Cabrera и соавт. [18] изучали показатели диффузионно-тензорной МРТ трактов лимбической системы, ответственных за когнитивные процессы, при этом ими также было обнаружено уменьшение объемов исследованных трактов, снижение FA и повышение ADC у пациентов при всех типах течения РС в сравнении со здоровым контролем, причем авторы, в отличие от нас, не выявили корреляции с данными нейропсихологических тестов и EDSS. Структуры лимбической системы, гиппокамп, свод и др. омываются цереброспинальной жидкостью

(ЦСЖ) III и боковых желудочков; это, по мнению авторов, подтверждает наличие провоспалительных факторов в ЦСЖ [19], следствием чего являются большое число перивентрикулярных очагов в БВ при РС, а также выраженность повреждения при небольшой длительности заболевания. Отметим, что пирамидный тракт при его прохождении в полушариях и стволе мозга не имеет такого близкого контакта с ЦСЖ.

Ранее неоднократно отмечалась недостаточная чувствительность и специфичность МРТ при оценке процессов нейровоспаления, демиелинизации и степени повреждения аксонов при применении режимов T2-ВИ и FLAIR, наиболее часто используемых специалистами лучевой диагностики и клиницистами в практической деятельности. Для преодоления ограничений традиционных методов шире применяется диффузионно-тензорная МРТ с трактографией, что позволяет получить количественную информацию об ультраструктуре ткани мозга; показана эффективность данного метода и при других неврологических заболеваниях [20].

Структурно патология ЦНС при РС проявляется демиелинизацией БВ и аксональной дегенерацией, что ведет к нарушению архитектоники БВ головного и спинного мозга. Недавние исследования показали, что у больных РС происходит изменение показателей ADC и FA как в местах поражения, так и в БВ, визуально не измененном, что может отражать микроструктурные повреждения вещества головного и спинного мозга [21, 22]. Повышение показателя ADC и снижение FA связывают с вазогенным отеком и воспалением БВ в очагах острой демиелинизации, но еще более выраженные сдвиги объясняют нейродегенеративным процессом, в результате чего происходит расширение внеклеточного пространства вследствие гибели аксонов [23].

Отмечено, что традиционно используемые режимы МРТ не позволяют получить всю необходимую информацию о поражении головного и спинного мозга у больных РС, особенно в процессе лечения. Этим обусловлена необходимость применения новых диагностических подходов [24–26].

Заключение. В результате проведенного исследования можно сделать вывод о ценности исследования пирамидного тракта у больных РС методом диффузионно-тензорной МРТ с трактографией для объективизации степени поражения волокон пирамидного тракта, поскольку этот метод позволяет получить количественную оценку его сохранности, демонстрируя не визуализируемые при использовании общепринятых режимов МРТ повреждения БВ.

Отмечено отчетливое снижение таких показателей, как объем, длина пирамидного тракта и FA, повышение ADC, асимметрия этих показателей, причем выявлены корреляции с уровнем пирамидной недостаточности, оценкой по EDSS и длительностью течения РС. Очевидно, что данный метод позволит более точно оценивать динамику заболевания и эффективность проводимой терапии.

Таблица 3. Величина коэффициентов корреляции между некоторыми переменными

Table 3. Magnitude of correlation coefficients between some variables

Корреляции между переменными	Rho Спирмена	P	Тай Кендалла	P	R Пирсона	P
EDSS vs. V	-0,5246	<0,001	-0,3976	<0,001		
ПФС vs. V	-0,4920	<0,001	-0,4158	<0,001		
ПФС vs. L	-0,3115	0,026	-0,2294	0,018		
Длительность РС vs. ADC					0,286	0,042
Длительность РС vs. FA					-0,290	0,039

Примечание. Приведены только значения коэффициентов корреляции с уровнем статистической значимости различий $p < 0,05$.

1. Singh S, Dallenga T, Winkler A, et al. Relationship of acute axonal damage, Wallerian degeneration, and clinical disability in multiple sclerosis. *J Neuroinflammation*. 2017 Mar 17;14(1):57. doi: 10.1186/s12974-017-0831-8
2. Herbert E, Engel-Hills P, Hattingh C, et al. Fractional anisotropy of white matter, disability and blood iron parameters in multiple sclerosis. *Metab Brain Dis*. 2018;33(2):545-57. doi: 10.1007/s11011-017-0171-5. Epub 2018 Feb 2.
3. Faivre A, Robinet E, Guye M, et al. Depletion of brain functional connectivity enhancement leads to disability progression in multiple sclerosis: A longitudinal resting-state fMRI study. *Mult Scler*. 2016;22(13):1695-708. doi: 10.1177/1352458516628657. Epub 2016 Feb 2.
4. Von Schwanenflug N, Koch SP, Krohn S, et al. Increased flexibility of brain dynamics in patients with multiple sclerosis. *Brain Commun*. 2023;5(3):fcad143. doi: 10.1093/braincomms/fcad143
5. Белов СЕ, Бойко АН. Симптом центральной вены в дифференциальной диагностике рассеянного склероза. *Неврология, нейропсихиатрия, психосоматика*. 2020;12(Прил. 1):29-32. doi: 10.14412/2074-2711-2020-1S-29-32 [Belov SE, Boyko AN. The central vein sign in the differential diagnosis of multiple sclerosis. *Nevrologiya, neiropsikhiatriya, psikhosomatika = Neurology, Neuropsychiatry, Psychosomatics*. 2020;12(Suppl. 1):29-32. doi: 10.14412/2074-2711-2020-1S-29-32 (In Russ.)].
6. Barkhof F, Calabresi PA, Miller DH, Reingold SC. Imaging outcomes for neuroprotection and repair in multiple sclerosis trials. *Nat Rev Neurol*. 2009 May;5(5):256-66. doi: 10.1038/nrneurol.2009.41
7. Akaishi T, Takahashi T, Fujihara K, et al. Number of MRI T1-hypointensity corrected by T2/FLAIR lesion volume indicates clinical severity in patients with multiple sclerosis. *PLoS One*. 2020;15(4):e0231225. doi: 10.1371/journal.pone.0231225
8. Kolind S, Matthews L, Johansen-Berg H, et al. Myelin water imaging reflects clinical variability in multiple sclerosis. *Neuroimage*. 2012;60(1):263-70. doi: 10.1016/j.neuroimage.2011.11.070. Epub 2011 Dec 6.
9. Johnson P, Vavasour IM, Stojkova BJ, et al. Myelin heterogeneity for assessing normal appearing white matter myelin damage in multiple sclerosis. *J Neuroimaging*. 2023;33(2):227-34. doi: 10.1111/jon.13069. Epub 2022 Nov 28.
10. Nataf S. Myelinodegeneration vs. Neurodegeneration in MS Progressive Forms. *Int J Mol Sci*. 2023 Jan 13;24(2):1596. doi: 10.3390/ijms24021596
11. Куликова СН, Брюхов ВВ, Переседова АВ и др. Диффузионная тензорная магнитно-резонансная томография и трактография при рассеянном склерозе: обзор литературы. *Журнал неврологии и психиатрии им. С.С. Корсакова. Спецвыпуски*. 2012;112(2-2):52-9. [Kulikova SN, Briukhov VV, Peresedova AV, et al. Diffusion-tensor magnetic resonance tomography and tractography in multiple sclerosis: a review. *Zhurnal nevrologii i psikhiiatrii imeni S.S. Korsakova = S.S. Korsakov Journal of Neurology and Psychiatry*. 2012;112(2-2):52-9 (In Russ.)].
12. Kulik SD, Nauta IM, Tewarie P, et al. Structure-function coupling as a correlate and potential biomarker of cognitive impairment in multiple sclerosis. *Netw Neurosci*. 2022;6(2):339-56. doi: 10.1162/netn_a_00226
13. Lipp I, Parker GD, Tallantyre EC, et al. Tractography in the presence of multiple sclerosis lesions. *Neuroimage*. 2020;209:116471. doi: 10.1016/j.neuroimage.2019.116471. Epub 2019 Dec 24.
14. Бойко АН, Бахтиярова КЗ, Шерман МА и др. Результаты исследования качества жизни у больных с высокоактивным рассеянным склерозом в России. *Неврология, нейропсихиатрия, психосоматика*. 2022;14(Прил. 1):9-15. doi: 10.14412/2074-2711-2022-1S-9-15 [Boiko AN, Bakhtiyarova KZ, Sherman MA, et al. Results of a study of the quality of life in patients with highly active multiple sclerosis in Russia. *Nevrologiya, neiropsikhiatriya, psikhosomatika = Neurology, Neuropsychiatry, Psychosomatics*. 2022;14(Suppl 1):9-15. doi: 10.14412/2074-2711-2022-1S-9-15 (In Russ.)].
15. Kurtzke JF. Rating neurologic impairment in multiple sclerosis: an expanded disability status scale (EDSS). *Neurology*. 1983 Nov;33(11):1444-52. doi: 10.1212/wnl.33.11.1444
16. Larassati H, Pandelaki J, Estiasari R, et al. Diffusion magnetic resonance imaging of normal-appearing white matter in multiple sclerosis: correlation with brain volume and clinical disability. *J Cent Nerv Syst Dis*. 2022;14:11795735221098147. doi: 10.1177/11795735221098147
17. Elsayed M, Abdulaziz K, El-Toukhy MMB, Asaad RE. Diffusion tensor imaging for assessment of normally appearing white matter of the brain and spinal cord in cases of multiple sclerosis: a multi-parametric correlation in view of patient's clinical status. *Egypt J Radiol Nucl Med*. 2019;50(30). doi: 10.1186/s43055-019-0031-x
18. Valdes Cabrera D, Stobbe R, Smyth P, et al. Diffusion tensor imaging tractography reveals altered fornix in all diagnostic subtypes of multiple sclerosis. *Brain Behav*. 2020 Jan;10(1):e01514. doi: 10.1002/brb3.1514. Epub 2019 Dec 19.
19. Matejcikova Z, Mares J, Prikrylova Vranova H, et al. Cerebrospinal fluid inflammatory markers in patients with multiple sclerosis: a pilot study. *J Neural Transm (Vienna)*. 2015 Feb;122(2):273-7. doi: 10.1007/s00702-014-1244-9. Epub 2014 Jun 4.
20. Парфенов ВА, Остроумова ТМ, Остроумова ОД и др. Диффузионно-тензорная магнитно-резонансная томография в диагностике поражения белого вещества головного мозга у пациентов среднего возраста с неосложненной эссенциальной артериальной гипертензией. *Неврология, нейропсихиатрия, психосоматика*. 2018;10(2):20-6. doi: 10.14412/2074-2711-2018-2-20-26 [Parfenov VA, Ostroumova TM, Ostroumova OD, et al. Diffusion tensor magnetic resonance imaging in the diagnosis of white matter lesion in middle-aged patients with uncomplicated essential hypertension. *Nevrologiya, neiropsikhiatriya, psikhosomatika = Neurology, neuropsychiatry, psychosomatics*. 2018;10(2):20-6. doi: 10.14412/2074-2711-2018-2-20-26 (In Russ.)].
21. Sbardella E, Tona F, Petsas N, Pantano P. DTI Measurements in Multiple Sclerosis: Evaluation of Brain Damage and Clinical Implications. *Mult Scler Int*. 2013;2013:671730. doi: 10.1155/2013/671730. Epub 2013 Mar 31.
22. Klistorner A, Wang C, Yiannikas C, et al. Diffusivity in the core of chronic multiple sclerosis lesions. *PLoS One*. 2018 Apr 25;13(4):e0194142. doi: 10.1371/journal.pone.0194142
23. Eisele P, Szabo K, Griebel M, et al. Reduced diffusion in a subset of acute MS lesions: A serial multiparametric MRI study. *AJNR Am J Neuroradiol*. 2012 Aug;33(7):1369-73. doi: 10.3174/ajnr.A2975. Epub 2012 May 10.
24. Zivadnov R, Stosic M, Cox JL, et al. The place of conventional MRI and newly emerging MRI techniques in monitoring different aspects of treatment outcome. *J Neurol*. 2008 Mar;255 Suppl 1:61-74. doi: 10.1007/s00415-008-1009-1
25. Wattjes MP, Steenwijk MD, Stangel M. MRI in the diagnosis and monitoring of multiple sclerosis: An update. *Clin Neuroradiol*. 2015 Oct;25 Suppl 2:157-65. doi: 10.1007/s00062-015-0430-y. Epub 2015 Jul 23.
26. Asaadi F, Faeghi F, Ashrafi F, Sanei Taheri M. Clinical Significance of Diffusion-weighted Magnetic Resonance Imaging on Treatment Efficacy in MS Patients With Acute Attacks. *Basic Clin Neurosci*. 2021 Nov-Dec;12(6):729-36. doi: 10.32598/bcn.2021.1560.1. Epub 2021 Nov 1.

Поступила/отрецензирована/принята к печати
Received/Reviewed/Accepted
10.02.2024/14.05.2024/15.05.2024

Заявление о конфликте интересов / Conflict of Interest Statement

Исследование не имело спонсорской поддержки. Конфликт интересов отсутствует. Авторы несут полную ответственность за предоставление окончательной версии рукописи в печать. Все авторы принимали участие в разработке концепции статьи и написании рукописи. Окончательная версия рукописи была одобрена всеми авторами.

The investigation has not been sponsored. There are no conflicts of interest. The authors are solely responsible for submitting the final version of the manuscript for publication. All the authors have participated in developing the concept of the article and in writing the manuscript. The final version of the manuscript has been approved by all the authors.

Пешкин А.Н. <https://orcid.org/0009-0009-9726-7679>
Тония Г.Т. <https://orcid.org/0009-0003-3973-5362>
Степанова Е.А. <https://orcid.org/0000-0002-9037-0034>
Лиждвой В.Ю. <https://orcid.org/0000-0003-0367-8282>
Котов С.В. <https://orcid.org/0000-0002-8706-7317>