



УДК 611.81+616.831-002-022+578.833.26]-616.98-053.2+616-073.756.8
DOI: 10.56871/ViM.2024.41.30.001

ДИФФУЗИОННО-ТЕНЗОРНАЯ МРТ В ДИАГНОСТИКЕ ОСТРЫХ ВИРУСНЫХ ЭНЦЕФАЛИТОВ У ДЕТЕЙ

© Елена Юрьевна Шевченко, Наталья Викторовна Марченко, Сабина Парвизовна Нарзиева, Дмитрий Леонидович Дубицкий, Дмитрий Юрьевич Новокшонов, Елена Юрьевна Скрипченко

Санкт-Петербургский государственный педиатрический медицинский университет. 194100, г. Санкт-Петербург, ул. Литовская, д. 2

Контактная информация: Елена Юрьевна Шевченко — врач-рентгенолог отделения функциональной и лучевой диагностики с кабинетами компьютерной томографии. E-mail: e.shevchenko.rad@gmail.com ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6600-6796> SPIN: 2777-6583

Для цитирования: Шевченко Е.Ю., Марченко Н.В., Нарзиева С.П., Дубицкий Д.Л., Новокшонов Д.Ю., Скрипченко Е.Ю. Диффузионно-тензорная МРТ в диагностике острых вирусных энцефалитов у детей // Визуализация в медицине. 2024. Т. 6. № 2. С. 4–9. DOI: <https://doi.org/10.56871/ViM.2024.41.30.001>

Поступила: 18.03.2024

Одобрена: 29.04.2024

Принята к печати: 27.06.2024

Резюме. Введение. Вирусный энцефалит является наиболее распространенным вариантом инфекционно-воспалительного поражения головного мозга у детей, имеет важное клиническое значение ввиду высокого уровня заболеваемости, выраженных неврологических последствий и является причиной высокого уровня смертности. Для оценки целостности проводящих путей головного мозга и вовлечения их в воспалительный процесс применяется методика диффузионно-тензорной МРТ (ДТ МРТ), включающей оценку таких параметров, как фракционная анизотропия (ФА), радиальная диффузивность (РД), аксиальная диффузивность (АД). **Цель исследования.** Изучение изменений показателей ДТ МРТ в остром периоде вирусного энцефалита различной этиологии у детей. **Материалы и методы.** В исследование были включены 30 пациентов с подтвержденным верифицированным диагнозом вирусного энцефалита в острую фазу заболевания различной этиологии. **Результаты.** У всех пациентов в очагах воспалительных изменений, локализованных в белом веществе, без признаков наличия цитотоксического отека в остром периоде заболевания отмечалось достоверное снижение показателя ФА, повышение РД, АД по сравнению с интактным симметричным участком в контралатеральном полушарии головного мозга. **Заключение.** Для острого периода вирусного энцефалита характерны структурные изменения проводящих путей, которые связаны с отеком и дезорганизацией нервных волокон. Изменения показателей, получаемых при ДТ МРТ, при вирусном энцефалите сопоставимы с другими патологиями, при которых поражается белое вещество головного мозга, и отражают патофизиологические процессы, которые лежат в основе воспаления. Использование методики ДТ МРТ для углубленного исследования изменений головного мозга при инфекционном поражении головного мозга позволяет получать анатомическую информацию о функциональном состоянии головного мозга неинвазивным способом, что в дальнейшем может стать основой построения персонализированной терапии в зависимости от характера повреждения мозговой ткани.

Ключевые слова: инфекционное поражение центральной нервной системы, вирусный энцефалит, диффузионно-тензорная МРТ, магнитно-резонансная томография в педиатрии

DIFFUSION TENSOR MRI IN THE DIAGNOSTIC OF ACUTE VIRAL ENCEPHALITIS IN CHILDREN

© Elena Yu. Shevchenko, Natalya V. Marchenko, Sabina P. Narzieva, Dmitriy L. Dubitskiy, Dmitriy Yu. Novokshonov, Elena Yu. Skripchenko

Saint Petersburg State Pediatric Medical University. 2 Lithuania, Saint Petersburg 194100 Russian Federation

Contact information: Elena Yu. Shevchenko — radiologist at the Department of functional and radiation diagnostics with computed tomography rooms. E-mail: e.shevchenko.rad@gmail.com ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6600-6796> SPIN: 2777-6583

For citation: Shevchenko EYu, Marchenko NV, Narzieva SP, Dubitskiy DL, Novokshonov DYU, Skripchenko EYu. Diffusion tensor MRI in the diagnostic of acute viral encephalitis in children. Visualization in medicine. 2024;6(2):4–9. DOI: <https://doi.org/10.56871/ViM.2024.41.30.001>

Received: 18.03.2024

Revised: 29.04.2024

Accepted: 27.06.2024

Abstract. Introduction. Viral encephalitis is the most common cause of infectious and inflammatory brain damage in children, which has important clinical significance due to its high mortality rate and residual neurological consequences. The diffusion tensor magnetic resonance imaging (DT MRI) uses for assessing the integrity of the nerve tracts and their involvement in the inflammatory process and includes the assessment of parameters such as fractional anisotropy (FA), radial diffusivity (RD), and axial diffusivity (AD). **Purpose of the study.** To identify changes in diffusion tensor imaging (DTI) in the acute viral encephalitis caused by different viral agents in children. **Materials and methods.** The study includes 30 patients of different ages with a verified diagnosis in the acute phase of the viral encephalitis. **Results.** It was noticed that all patients that have in foci the inflammatory changes in the white matter, without signs of cytotoxic edema during the acute period of the disease also have a significant decrease in FA, an increase in RD and AD in comparison with the intact symmetrical area of the brain in the contralateral cerebral hemisphere. **Conclusion.** The acute period of viral encephalitis is characterized by structural changes in the nerve tracts, which are associated with swelling and disorganization of nerve fibers. Changes of DTI in viral encephalitis are comparable to other pathologies that affect white matter of the brain and reflect the pathophysiological processes that serve as the basis for inflammation. Using of the DTI for an in-depth study of changes in the brain during an infectious brain lesion allows to study anatomical information about the functional state of the brain in a non-invasive way, which in the future can become the basis for developing personalized therapy depending on the nature of the damage to the brain tissue.

Keywords: central nervous system infections in children, viral encephalitis, diffusion tensor MRI, magnetic resonance imaging in children

ВВЕДЕНИЕ

Вирусный энцефалит (ВЭ) является наиболее распространенным вариантом инфекционно-воспалительного поражения паренхимы головного мозга у детей, имеет важное клиническое значение ввиду высокого уровня заболеваемости в сравнении со взрослыми пациентами, выраженных неврологических последствий и является причиной высокого уровня смертности. Последствиями вирусного энцефалита могут быть энцефалопатия, нарушение психомоторного развития, судороги и эпилепсия, стойкий неврологический дефицит, смерть [1].

Для своевременной оценки поражения вещества головного мозга при вирусном энцефалите проводится нейровизуализационное исследование, изменения при котором являются одним из критериев постановки диагноза [2–4].

Компьютерную томографию (КТ) головного мозга рекомендуется проводить перед люмбальной пункцией для анализа спинномозговой жидкости при подозрении на повышенное внутричерепное давление и для исключения дислокации [5]. Магнитно-резонансная томография (МРТ) обеспечивает лучшую визуализацию поражения головного мозга при воспалении, позволяет более точно и подробно оценить распространенность воспалительных изменений и провести дифференциальную диагностику с другими заболеваниями центральной нервной системы (ЦНС) [2, 6].

Для оценки целостности проводящих путей головного мозга и вовлечения их в воспалительный процесс применяется методика диффузионно-тензорной МРТ (ДТ МРТ). Данная методика является неинвазивным способом оценки количественных параметров диффузионных процессов в головном мозге с учетом сложного строения нервных волокон,

вследствие чего может быть получена уникальная анатомическая информация об архитектуре аксоновых путей и их изменении, которую нельзя получить при обычном рутинном обследовании [7–11].

Данные, получаемые при ДТ МРТ, содержатся в тензоре, являющемся математической моделью диффузии молекул воды по нескольким осям в трехмерном пространстве [12, 13].

Количественными параметрами, оцениваемыми при ДТ МРТ, являются фракционная анизотропия (ФА), радиальная диффузивность (РД), аксиальная диффузивность (АД) [14]. АД демонстрирует диффузию воды вдоль главной оси диффузии по нервным волокнам, и ее изменения косвенно отражают аксональное повреждение, разобщенность нервных волокон, сниженную плотность аксонов вследствие увеличения межаксонального пространства [15, 16]. РД характеризует диффузию молекул воды перпендикулярно главной оси диффузии, и изменение этого параметра может быть связано с повреждением миелина, аксонов [14, 17]. Средняя диффузивность (СД) является усредненным значением радиальной и осевой диффузивности [14].

ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Целью настоящего исследования было изучение изменений показателей ДТ МРТ в остром периоде вирусного энцефалита различной этиологии у детей.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Обследованы 30 пациентов (11 мальчиков и 19 девочек) от 1 года до 17 лет с клинико-лабораторно верифицированным острым вирусным энцефалитом герпетической, герпесвирусной, энтеровирусной этиологии в остром и подостром

периоде заболевания. У всех пациентов клинический диагноз был подтвержден с помощью лабораторных исследований (полимеразная цепная реакция (ПЦР), иммуноферментный анализ (ИФА)).

Пациенты были обследованы на высокопольном томографе Philips Ingenia (Нидерланды) с напряженностью магнитного поля 1,5 Т с использованием 8-канальной катушки для исследования головы. ДТ МРТ (DTI SE-EPI (Diffusion tensor imaging spin-echo echo-planar imaging)) проводилась при следующих параметрах: b-value $b=0, b=500, b=1000$ с/мм², количество направлений 15, аксиальная плоскость, время повторения (TR) — 2900 мс, время эхо (TE) — 84 мс, поле обзора (FOV) — 224×224 мм, толщина среза — 2,5 мм, количество срезов 48, EPI-фактор 45, матрица 92×90. Время сбора данных — 6 минут 8 секунд. При необходимости и с целью исключения двигательных артефактов у пациентов с высокой двигательной активностью врачом-анестезиологом применялась общая анестезия с мониторингом витальных функций (частота пульса, дыхания, электрокардиография (ЭКГ), SpO₂) на протяжении всего исследования.

Постпроцессинговая обработка данных осуществлялась с использованием программного обеспечения Philips IntelliSpace Portal. Для оценки данных с помощью анализа области интереса (ROI) в пораженной паренхиме головного мозга производилось выделение областей интереса вручную на цветовых картах ФА, РД, АД в очаге поражения в белом веществе и в интактном симметричном участке контралатерального полушария с последующим автоматическим вычислением числовых зна-

чений соответствующих показателей ДТ МРТ (ФА, АД, РД). Статистическая обработка данных осуществлялась с помощью прикладного программного обеспечения Microsoft Excel, STATISTICA 10, с использованием непараметрических критериев для оценки значимости различий между независимыми выборками (U-критерий Манна–Уитни, уровень значимости $p=0,05$).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

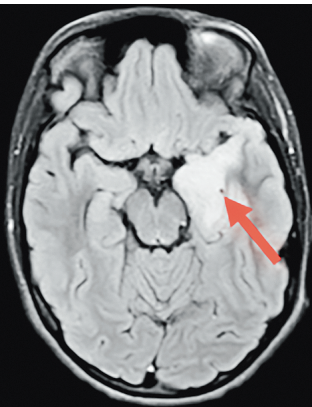
По результатам проведенного исследования было показано, что у всех пациентов (100%) в очагах воспалительных изменений, локализованных в белом веществе, без признаков наличия цитотоксического отека по данным диффузионно-взвешенных изображений (b-фактор 1000 с/мм²), в остром периоде заболевания отмечалось достоверное снижение показателя ФА, повышение РД, АД по сравнению с интактным симметричным участком в контралатеральном полушарии головного мозга (табл. 1).

Снижение показателя ФА может являться следствием процессов, которые уменьшают анизотропию

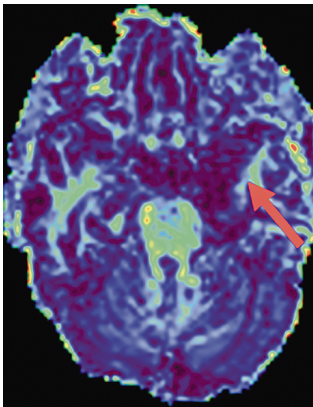
Таблица 1

Результаты измерения параметров ДТ МРТ при вирусном энцефалите

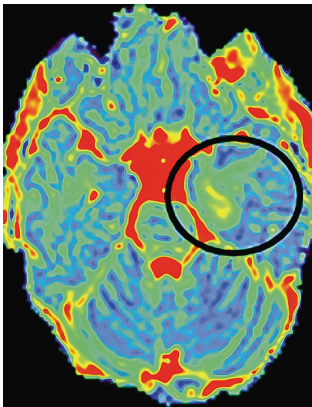
Показатель	Очаг	Контралатеральный участок
ФА	$0,17 \pm 0,11$	$0,49 \pm 0,06$
ОД	$1,65 \pm 0,25 \times 10^{-3}$ мм ² /с	$1,3 \pm 0,11 \times 10^{-3}$ мм ² /с
РД	$1,23 \pm 0,32 \times 10^{-3}$ мм ² /с	$0,61 \pm 0,11 \times 10^{-3}$ мм ² /с



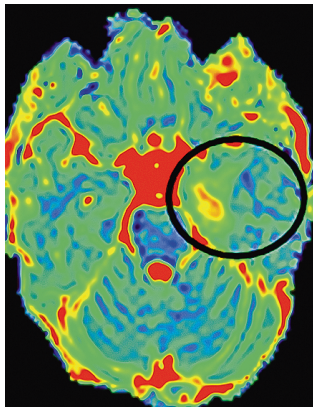
Д., 14 лет. Энцефалит, вызванный вирусом герпеса человека 1/2 типа. Диффузная зона воспалительных изменений в левой височной доле (красная стрелка)



DTI. ФА. Снижение ФА до 0,07 (красная стрелка). Значение ФА в контралатеральном полушарии 0,52



DTI. АД. Повышение АД до $1,81 \times 10^{-3}$ мм²/с (черный круг). Значение АД в контралатеральном полушарии $0,99 \times 10^{-3}$ мм²/с



DTI. РД. Повышение РД до $1,54 \times 10^{-3}$ мм²/с (черный круг). Значение РД в контралатеральном полушарии $0,69 \times 10^{-3}$ мм²/с

Рис. 1. Клинический пример острого герпесвирусного энцефалита (вирус герпеса человека 1-2 типа) у девочки 14 лет. FLAIR. Диффузная зона воспалительных изменений в левой височной доле (красная стрелка)

диффузии вдоль трактов, таких как отек, разобщение и деструкция нервных волокон [8, 18].

Повышение диффузии молекул воды вдоль и поперек нервных волокон по данным АД и РД соответственно расценивается как облегчение диффузионного процесса в ткани головного мозга. Патоморфологическими предпосылками данных изменений при воспалительном процессе может быть повреждение мембран нервных волокон, миелиновой оболочки, самих аксонов без их полной утраты [15, 17].

Своевременная диагностика и научно обоснованное прогнозирование течения инфекционного процесса и его исходов имеют важное значение в ведении пациентов. Использование структурной МРТ не позволяет объективно оценить степень и характер поражения волокон головного мозга. Сведения о масштабе поражения могут не соответствовать тяжести состояния пациента [19].

Среди всего массива изученных данных преобладают научные работы по изучению изменения структур при энцефалитах различной этиологии у пациентов взрослого возраста преимущественно с оценкой показателя ФА. В исследовании К.А. Cauley и соавт. сообщалось о снижении показателя ФА в острый период энцефалита, вызванного вирусом простого герпеса [20], снижении показателя ФА при энцефалите Расмуссена [20], снижении показателя ФА при подостром склерозирующем панэнцефалите [21], снижении показателя ФА и повышении СД при анти-NMDA-рецепторном энцефалите [22].

Данные, полученные нами, соотносятся с изменениями показателя ФА при других энцефалитах в остром периоде заболевания, что позволяет предполагать схожие патогенетические механизмы, которые включают в себя отек и разобщение нервных волокон (рис. 1).

Углубленное использование методики ДТ МРТ с измерением АД и РД для исследования изменений головного мозга при вирусных энцефалитах у детей не проводилось. Для попытки корреляции патофизиологических процессов, происходящих в очагах поражения при различных заболеваниях ЦНС, приведем несколько примеров.

При активном воспалении в очагах демиелинизации при рассеянном склерозе определяются снижение ФА, повышение РД и СД [23], повышение АД [24], а в большинстве хронических гипointенсивных очагов на T1-ВИ («черные дыры»), в своей основе характеризующихся потерей аксонов, определяется повышение АД и РД [25]. При диффузном аксональном повреждении, в основе которого лежит мультифокальное повреждение аксонов, увеличение АД отражает патологию самого аксона,

например, вследствие травмы. РД отражает диффузионную способность, перпендикулярную аксональным волокнам, и, по-видимому, более тесно коррелирует с аномалиями миелина, либо дисмиелинизацией, либо демиелинизацией [26].

ДТ МРТ является перспективной методикой, которая позволяет получать анатомическую информацию о функциональном состоянии головного мозга, не определяемую другими методиками МРТ, что делает ее важной в характеристике изменений белого вещества и проводящих путей головного мозга. Исходя из вышеизложенного, ясна необходимость углубленного изучения параметров ДТ МРТ при инфекционном поражении головного мозга у детей различных возрастов, так как полученные данные, предположительно, могут стать основой построения персонализированной терапии в зависимости от характера и степени повреждения проводящих путей головного мозга, контроля лечения и восстановительных реабилитационных мероприятий при вирусных энцефалитах.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Вклад авторов. Все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией.

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Источник финансирования. Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

Информированное согласие на публикацию. Авторы получили письменное согласие законных представителей пациента на публикацию медицинских данных.

ADDITIONAL INFORMATION

Author contribution. Thereby, all authors made a substantial contribution to the conception of the study, acquisition, analysis, interpretation of data for the work, drafting and revising the article, final approval of the version to be published and agree to be accountable for all aspects of the study.

Competing interests. The authors declare that they have no competing interests.

Funding source. This study was not supported by any external sources of funding.

Consent for publication. Written consent was obtained from legal representatives of the patient for publication of relevant medical information within the manuscript.

ЛИТЕРАТУРА

1. Sonnevile R., Jaquet P., Vellieux G., de Montmollin E., Visseaux B. Intensive care management of patients with viral encephalitis. *Rev Neurol (Paris)*. 2022;178(1-2):48–56.
2. Venkatesan A., Tunkel A.R., Bloch K.C., Luring A.S., Sejar J., Bitnun A. et al. Case definitions, diagnostic algorithms, and priorities in encephalitis: consensus statement of the international encephalitis consortium. *Clin Infect Dis*. 2013; 57:1114–1128.
3. Марченко Н.В., Войтенков В.Б., Горелик Е.Ю. и др. Мультипараметрическая магнитно-резонансная томография в диагностике энцефалита, вызванного герпесвирусами, у детей. *Лучевая диагностика и терапия*. 2021;4(12):23–32.
4. Войтенков В.Б., Синкин М.В., Скрипченко Н.В., Екушева Е.В., Горелик Е.Ю., Марченко Н.В., Штеклейн А.В., Бедова М.А. Биоэлектрическая активность головного мозга у детей с острым вирусным энцефалитом. *Российский физиологический журнал им. И.М. Сеченова*. 2020;196(7):1–8.
5. Kneen R., Michael B.D., Menson E., Mehta B., Easton A., Hemingway C. et al. Management of suspected viral encephalitis in children — Association of British Neurologists and British Paediatric Allergy, Immunology and Infection Group National Guidelines. *J Infect*. 2012;64:449–477.
6. Марченко Н.В., Войтенков В.Б., Скрипченко Н.В., Бедова М.А., Курзанцева О.О. Магнитно-резонансная томография как инструмент дифференциальной диагностики при поражении ствола головного мозга у детей. *Клиническая практика*. 2020;11(1):81–91.
7. Wang Y., Xu M., Geng L., Zhao Y., Guo Z., Fan Y., Niu Y. DTI Atlases Evaluations. *Neuroinformatics*. 2022;20(2):327–351.
8. Mori S., Tournier J.D. Introduction to diffusion tensor imaging: And higher order models: Second edition. Elsevier Inc.; 2013.
9. Марченко Н.В., Новокшенов Д.Ю., Шевченко Е.Ю., Бедова М.А., Алиев Р.В., Дубицкий Д.Л., Клишкин А.В., Войтенков В.Б., Скрипченко Н.В. Показатели фракционной анизотропии вещества головного мозга у здоровых детей: когортное исследование. *Лучевая диагностика и терапия*. 2022;3(13):7–17.
10. Beaulieu C. The Biological Basis of Diffusion Anisotropy. Diffusion MRI. Academic Press; 2009.
11. Алиев Р.В., Ирикова М.А., Васильева Ю.П., Вильниц А.А., Войтенков В.Б., Горелик Е.Ю., Дубицкий Д.Л., Клишкин А.В., Марченко Н.В., Новокшенов Д.Ю., Скрипченко Н.В., Скрипченко Е.Ю., Шевченко Е.Ю. Нейровизуализация при энцефалитах и менингитах у детей. Санкт-Петербург; 2023.
12. Jellison B.J., Field A.S., Medow J., Lazar M., Shariar M.S., Andrew L.A. Diffusion tensor imaging of cerebral white matter: a pictorial review of physics, fiber tract anatomy, and tumor imaging patterns. *Am J Neuroradiol*. 2004;25(3):356–369.
13. Китаев С.В., Попова Т.А. Принципы визуализации диффузионного тензора и его применение в неврологии. *Анналы клинической и экспериментальной неврологии*. 2012;(1):48–54.
14. Larvie M., Fischl B. Volumetric and fiber-tracing MRI methods for gray and white matter. *Handb Clin Neurol*. 2016;135:39–58.
15. Qiu D., Tan L. H., Zhou K., Khong P.L. Diffusion tensor imaging of normal white matter maturation from late childhood to young adulthood: voxel-wise evaluation of mean diffusivity, fractional anisotropy, radial and axial diffusivities, and correlation with reading development. *NeuroImage*. 2008;41(2):223–232.
16. Брюхов В.В., Куликова С.Н., Кротенкова М.В., Переседова А.В., Завалишин И.А. Современные методы визуализации в патогенезе рассеянного склероза. *Анналы клинической и экспериментальной неврологии*. 2013;3:47–53.
17. Della Nave R., Ginestroni A., Diciotti S., Salvatore E., Soricelli A., Mascalchi M. Axial diffusivity is increased in the degenerating superior cerebellar peduncles of Friedreich's ataxia. *Neuroradiology*. 2010;53(5):367–372.
18. Ceccarelli A., Rocca M. A., Falini A., Tortorella P., Pagani E., Rodegher M., Comi G., Scotti G., Filippi M. Normal-appearing white and grey matter damage in MS: a volumetric and diffusion tensor MRI study at 3.0 Tesla. *J Neurol*. 2007;254(4):513–518.
19. Марченко Н.В., Войтенков В.Б., Скрипченко Н.В., Курзанцева О.О. Магнитно-резонансная томография как инструмент прогнозирования при энцефалитах у детей. *Клиническая практика*. 2019;10(3):55–60.
20. Cauley K.A., Burbank H.N., Filippi C.G. Diffusion tensor imaging and tractography of Rasmussen encephalitis. *Pediatr Radiol*. 2009;39(7):727–730.
21. Saurabh K., Singh V.K., Pathak A., Chaurasia R.N., Verma A., Mishra V.N., Joshi D., Kumar A. Clinical profile and diffusion tensor imaging in patients of subacute sclerosing pan encephalitis: a prospective follow-up study from eastern part of india. *Neurol India*. 2022;70(1):197–202.
22. Liang Y., Cai L., Zhou X., Huang H., Zheng J. Voxel-based analysis and multivariate pattern analysis of diffusion tensor imaging study in anti-NMDA receptor encephalitis. *Neuroradiology*. 2020;62(2):231–239.
23. Rocca M.A., Preziosa P., Mesaros S. et al. Clinically isolated syndrome suggestive of multiple sclerosis: dynamic patterns of gray and white matter changes—a 2-year MR imaging study. *Radiology*. 2016;278(3):841–853.
24. Ontaneda D., Sakaie K., Lin J. et al. Measuring brain tissue integrity during 4 years using diffusion tensor imaging. *AJNR Am J Neuroradiol*. 2017;38(1):31–38.
25. Klistorner A., Wang C., Fofanova V. et al. Diffusivity in multiple sclerosis lesions: at the cutting edge? *Neuroimage Clin*. 2016;12:219–226.
26. Kraus M.F., Susmaras T., Caughlin B.P., Walker C.J., Sweeney J.A., Little D.M. White matter integrity and cognition in chronic traumatic brain injury: a diffusion tensor imaging study. *Brain*. 2007;130(10):2508–2519.

REFERENCES

1. Sonnevile R., Jaquet P., Vellieux G., de Montmollin E., Visseaux B. Intensive care management of patients with viral encephalitis. *Rev Neurol (Paris)*. 2022;178(1-2):48–56.
2. Venkatesan A., Tunkel A.R., Bloch K.C., Luring A.S., Sejvar J., Bitnun A. et al. Case definitions, diagnostic algorithms, and priorities in encephalitis: consensus statement of the international encephalitis consortium. *Clin Infect Dis*. 2013;57:1114–1128.
3. Marchenko N.V., Voitenkov V.B., Gorelik E.Yu. et al. Multiparametric magnetic resonance imaging in the diagnosis of encephalitis caused by herpes viruses in children. *Luchevaya diagnostika i terapiya*. 2021;4(12):23–32. (In Russian).
4. Voitenkov V.B., Sinkin M.V., Skripchenko N.V., Ekusheva E.V., Gorelik E.Yu., Marchenko N.V., Shteklein A.V., Bedova M.A. Bioelectric activity of the brain in children with acute viral encephalitis. *Rossiyskiy fiziologicheskii zhurnal im. I.M. Sechenova*. 2020;196(7):1–8. (In Russian).
5. Kneen R., Michael B.D., Menson E., Mehta B., Easton A., Hemingway C. et al. Management of suspected viral encephalitis in children — Association of British Neurologists and British Paediatric Allergy, Immunology and Infection Group National Guidelines. *J Infect*. 2012;64:449–477.
6. Marchenko N.V., Voitenkov V.B., Skripchenko N.V., Bedova M.A., Kurzantseva O.O. Magnetic resonance imaging as a differential diagnostic tool for brainstem lesions in children. *Klinicheskaya praktika*. 2020;11(1):81–91. (In Russian).
7. Wang Y., Xu M., Geng L., Zhao Y., Guo Z., Fan Y., Niu Y. DTI Atlases Evaluations. *Neuroinformatics*. 2022;20(2):327–351.
8. Mori S., Tournier J.D. Introduction to diffusion tensor imaging: And higher order models: Second edition. Elsevier Inc.; 2013.
9. Marchenko N.V., Novokshonov D.Yu., Shevchenko E.Yu., Bedova M.A., Aliev R.V., Dubitsky D.L., Klimkin A.V., Voitenkov V.B., Skripchenko N.V. Indicators of fractional anisotropy of brain matter in healthy children: a cohort study. *Luchevaya diagnostika i terapiya*. 2022;3(13):7–17. (In Russian).
10. Beaulieu C. The Biological Basis of Diffusion Anisotropy. Diffusion MRI. Academic Press; 2009.
11. Aliev R.V., Irikova M.A., Vasilyeva Yu.P., Vilnits A.A., Voitenkov V.B., Gorelik E.Yu., Dubitsky D.L., Klimkin A.V., Marchenko N.V., Novokshonov D.Yu., Skripchenko N.V., Skripchenko E.Yu., Shevchenko E.Yu. Neuroimaging for encephalitis and meningitis in children. Saint Petersburg; 2023. (In Russian).
12. Jellison B.J., Field A.S., Medow J., Lazar M., Shariar M.S., Andrew L.A. Diffusion tensor imaging of cerebral white matter: a pictorial review of physics, fiber tract anatomy, and tumor imaging patterns. *Am J Neuroradiol*. 2004;25(3):356–369.
13. Kitaev S.V., Popova T.A. Principles of diffusion tensor imaging and its application in neurology. *Annaly klinicheskoy i eksperimental'noy nevrologii*. 2012;(1):48–54. (In Russian).
14. Larvie M., Fischl B. Volumetric and fiber-tracing MRI methods for gray and white matter. *Handb Clin Neurol*. 2016;135:39–58.
15. Qiu D., Tan L. H., Zhou K., Khong P.L. Diffusion tensor imaging of normal white matter maturation from late childhood to young adulthood: voxel-wise evaluation of mean diffusivity, fractional anisotropy, radial and axial diffusivities, and correlation with reading development. *NeuroImage*. 2008;41(2):223–232.
16. Bryukhov V.V., Kulikova S.N., Krotenkova M.V., Peresedova A.V., Zavalishin I.A. Modern imaging methods in the pathogenesis of multiple sclerosis. *Annaly klinicheskoy i eksperimental'noy nevrologii*. 2013;3:47–53. (In Russian).
17. Della Nave R., Ginestroni A., Diciotti S., Salvatore E., Soricelli A., Mascalchi M. Axial diffusivity is increased in the degenerating superior cerebellar peduncles of Friedreich's ataxia. *Neuroradiology*. 2010;53(5):367–372.
18. Ceccarelli A., Rocca M. A., Falini A., Tortorella P., Paganini E., Rodegher M., Comi G., Scotti G., Filippi M. Normal-appearing white and grey matter damage in MS: a volumetric and diffusion tensor MRI study at 3.0 Tesla. *J Neurol*. 2007;254(4):513–518.
19. Marchenko N.V., Voitenkov V.B., Skripchenko N.V., Kurzantseva O.O. Magnetic resonance imaging as a prognostic tool for encephalitis in children. *Klinicheskaya praktika*. 2019;10(3):55–60. (In Russian).
20. Cauley K.A., Burbank H.N., Filippi C.G. Diffusion tensor imaging and tractography of Rasmussen encephalitis. *Pediatr Radiol*. 2009;39(7):727–730.
21. Saurabh K., Singh V.K., Pathak A., Chaurasia R.N., Verma A., Mishra V.N., Joshi D., Kumar A. Clinical profile and diffusion tensor imaging in patients of subacute sclerosing pan encephalitis: a prospective follow-up study from eastern part of india. *Neurol India*. 2022;70(1):197–202.
22. Liang Y., Cai L., Zhou X., Huang H., Zheng J. Voxel-based analysis and multivariate pattern analysis of diffusion tensor imaging study in anti-NMDA receptor encephalitis. *Neuroradiology*. 2020;62(2):231–239.
23. Rocca M.A., Preziosa P., Mesaros S. et al. Clinically isolated syndrome suggestive of multiple sclerosis: dynamic patterns of gray and white matter changes—a 2-year MR imaging study. *Radiology*. 2016;278(3):841–853.
24. Ontaneda D., Sakaie K., Lin J. et al. Measuring brain tissue integrity during 4 years using diffusion tensor imaging. *AJNR Am J Neuroradiol*. 2017;38(1):31–38.
25. Klistorner A., Wang C., Fofanova V. et al. Diffusivity in multiple sclerosis lesions: at the cutting edge? *Neuroimage Clin*. 2016;12: 219–226.
26. Kraus M.F., Susmaras T., Caughlin B.P., Walker C.J., Sweeney J.A., Little D.M. White matter integrity and cognition in chronic traumatic brain injury: a diffusion tensor imaging study. *Brain*. 2007;130(10):2508–2519.