



ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

Оригинальная статья
УДК 616.832-004.21
<https://doi.org/10.52560/2713-0118-2025-6-13-28>

Применение постконтрастной визуализации в режиме T2 FLAIR в диагностике рассеянного склероза

Д. С. Стегура¹, Р. Н. Коновалов², И. А. Бердалина³,
В. В. Брюхов⁴, М. В. Кротенкова⁵

¹⁻⁵ ФГБНУ «Российский центр неврологии и нейронаук», Москва, Россия

¹ <https://orcid.org/0000-0002-1395-8264>

² <https://orcid.org/0000-0001-5539-245X>

³ <https://orcid.org/0009-0001-8707-180X>

⁴ <https://orcid.org/0000-0002-1645-6526>

⁵ <https://orcid.org/0000-0003-3820-4554>

Автор, ответственный за переписку: Диана Сергеевна Стегура, stegura@neurology.ru

Аннотация

Магнитно-резонансная томография (МРТ) является способом подтверждения диагноза рассеянный склероз (РС), она позволяет проводить дифференциальную диагностику, отслеживать эффективность лечения, а также оценивать активность процесса при использовании контрастных средств. Безусловно T1 взвешенные изображения являются золотым стандартом определения накопления контрастного средства в очагах демиелинизации. Однако в последние годы есть гипотеза о том, что применение режима T2 FLAIR с контрастным усилением может увеличить диагностический потенциал в выявлении активных очагов при РС. В настоящей работе проведена оценка возможности применения постконтрастной визуализации в режиме T2 FLAIR в диагностике рассеянного склероза.

Цель исследования. Оценить роль постконтрастной визуализации в режиме T2 FLAIR в диагностике очагов демиелинизации в веществе головного мозга при рассеянном склерозе.

Материалы и методы. В исследование вошли 60 пациентов с рассеянным склерозом в возрасте 20–59 лет. МРТ проводилась на двух томографах: Siemens Magnetom Avanto (1,5 Тл, n = 30) и Siemens Magnetom Prisma (3,0 Тл, n = 30). Протокол включал стандартные режимы сканирования, а также T1 MPRAGE и T2 FLAIR до и после контрастирования гадопуролом (0,1 ммоль/кг).

Оценка контрастного усиления проводилась по индексу контрастности (ИК) до и после введения КС с последующим расчетом прироста интенсивности сигнала (ΔИК). Также было проведено сопоставление очагов контрастирования по типам накопления контрастно-

© Стегура Д. С., Коновалов Р. Н., Бердалина И. А., Брюхов В. В., Кротенкова М. В., 2025

го средства в режимах T1 MPRAGE и T2 FLAIR. Оценивалась возможность использования категориальной оценки накопления контрастного средства в режиме T2 FLAIR для прогнозирования наличия/отсутствия контрастного усиления в режиме T1 MPRAGE, а также возможность использования ДИК в режиме T2 FLAIR для прогнозирования наличия/отсутствия накопления в режиме T1 MPRAGE.

Результаты. В исследование включены 60 пациентов с рассеянным склерозом, у которых было выявлено 132 очага демиелинизации по данным МРТ с контрастным усилением на томографах Siemens Magnetom Avanto (1,5 Тл) и Siemens Magnetom Prisma (3,0 Тл). Из них 35 очагов (26,5 %) накапливали контраст в режиме T1 MPRAGE, который считается золотым стандартом. При этом 16,5 % очагов демонстрировали накопление контраста в режиме T2 FLAIR, несмотря на его отсутствие в T1 MPRAGE.

Анализ показал, что накопление в режиме T2 FLAIR достоверно коррелировало с таковым в T1 MPRAGE ($p < 0,001$). Вычисление индекса контрастности (ИК) и его прироста (ДИК) подтвердило различия между группами. Прогностическая способность режима T2 FLAIR при визуальной оценке для выявления очагов с накоплением в T1 MPRAGE составила: чувствительность – 94,3 %, специфичность – 83,5 %, точность – 86,4 %. ROC-анализ показал AUC (площадь под кривой) = 0,934 (95% ДИ: 0,875; 0,994), что свидетельствует о высокой диагностической ценности ДИК в T2 FLAIR для предсказания накопления контраста в T1 MPRAGE.

Выводы. Включение режима T2 FLAIR после введения контрастного средства в стандартный протокол МРТ-исследования пациентов является важным аспектом диагностики рассеянного склероза с целью получения дополнительной информации. Требуется дальнейшее изучение применения постконтрастной визуализации в режиме T2 FLAIR и расширение оцениваемых показателей на большей когорте пациентов.

Ключевые слова: МРТ, рассеянный склероз, постконтрастный T2 FLAIR, T2 FLAIR, накопление контрастного средства, гадобутол

Для цитирования: Стегура Д. С., Коновалов Р. Н., Бердалина И. А., Брюхов В. В., Кротенкова М. В. Применение постконтрастной визуализации в режиме T2 FLAIR в диагностике рассеянного склероза // Радиология – практика. 2025;6:13-28. <https://doi.org/10.52560/2713-0118-2025-6-13-28>

Источники финансирования

Исследование не финансировалось какими-либо источниками.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что данная работа, ее тема, предмет и содержание не затрагивают конкурирующих интересов. Мнения, изложенные в статье, принадлежат авторам рукописи. Авторы подтверждают соответствие своего авторства международным критериям ICMJE.

Соответствие принципам этики

Работа соответствует этическим нормам Хельсинкской декларации Всемирной медицинской ассоциации «Этические принципы проведения научных медицинских исследований с участием человека» с поправками 2008 года и «Правилами клинической практики в Российской Федерации», утвержденными Приказом Минздрава РФ от 19.06.2003.

ORIGINAL RESEARCH

Original article

Application of Post-Contrast T2 FLAIR Imaging in the Diagnosis of Multiple Sclerosis

Diana S. Stegura¹, Rodion N. Konovalov², Irina A. Berdalina³,
Vasilii V. Bryukhov⁴, Marina V. Krotenkova⁵

¹⁻⁵Russian Center of Neurology and Neurosciences, Moscow, Russia

¹ <https://orcid.org/0000-0002-1395-8264>

² <https://orcid.org/0000-0001-5539-245X>

³ <https://orcid.org/0009-0001-8707-180X>

⁴ <https://orcid.org/0000-0002-1645-6526>

⁵ <https://orcid.org/0000-0003-3820-4554>

Corresponding author: Diana S. Stegura, stegura@neurology.ru

Abstract

Magnetic resonance imaging (MRI) is one of the key tools for confirming the diagnosis of multiple sclerosis (MS). It also enables differential diagnosis, monitoring of treatment effectiveness, and assessment of disease activity using contrast agents. T1-weighted images are traditionally considered the gold standard for detecting contrast enhancement in demyelinating lesions. However, recent hypotheses suggest that post-contrast T2 FLAIR mode may increase the diagnostic yield in identifying active MS lesions. This study evaluates the potential of post-contrast T2 FLAIR imaging in the diagnosis of multiple sclerosis.

Aim. To assess the role of postcontrast T2 FLAIR imaging in detecting demyelinating lesions in the brain in patients with multiple sclerosis.

Materials and Methods. The study included 60 patients with multiple sclerosis aged 20–59 years. MRI was performed on two scanners: Siemens Magnetom Avanto (1.5 T, n = 30) and Siemens Magnetom Prisma (3.0 T, n = 30). The protocol included standard modes, as well as T1 MPRAGE and T2 FLAIR before and after administration of gadobutrol (0.1 mmol/kg). Contrast enhancement was evaluated using the contrast index (CI) before and after contrast administration, followed by calculation of the signal intensity increase (Δ CI). Lesions were also compared based on the pattern of contrast accumulation in T1 MPRAGE and T2 FLAIR modes. The study further assessed whether visual contrast enhancement in T2 FLAIR could predict enhancement in T1 MPRAGE, and whether Δ CI in T2 FLAIR could be used as a predictive marker.

Results. A total of 132 demyelinating lesions were identified in 60 patients undergoing contrast-enhanced MRI. Of these, 35 lesions (26.5 %) showed enhancement in the T1 MPRAGE mode. Notably, 16.5 % of lesions showed enhancement in T2 FLAIR despite the absence of enhancement in T1 MPRAGE. There was a statistically significant correlation between enhancement in T2 FLAIR and T1 MPRAGE ($p < 0.001$). CI and Δ CI calculations confirmed intergroup differences. The diagnostic performance of T2 FLAIR visual analysis in predicting T1 MPRAGE enhancement showed a sensitivity of 94.3 %, specificity of 83.5 %, and accuracy of 86.4 %. ROC analysis revealed an AUC of 0.934 (95 % CI: 0.875–0.994), indicating excellent predictive ability of Δ CI in T2 FLAIR for contrast accumulation in T1 MPRAGE.

Conclusion. Incorporating post-contrast T2 FLAIR into standard MRI protocols for MS patients is a valuable diagnostic tool that may provide additional information. Further studies with larger cohorts are warranted to explore the full potential of post-contrast T2 FLAIR imaging in clinical practice.

Keywords: MRI, Multiple Sclerosis, Postcontrast T2 FLAIR, T2 FLAIR, Contrast Enhancement, Gadobutrol

For citation: Stegura D. S., Konovalov R. N., Berdalina I. A., Bryukhov V. V., Krotenkova M. V. Application of post-contrast T2 FLAIR imaging in the diagnosis of multiple sclerosis. *Radiology – Practice*. 2025;6:13-28. (In Russ.). <https://doi.org/10.52560/2713-0118-2025-6-13-28>

Funding

The study was not funded by any sources.

Conflicts of Interest

The authors state that this work, its topic, subject and content do not affect competing interests. The opinions expressed in the article belong to the authors of the manuscript. The authors confirm the compliance of their authorship with the international ICMJE criteria (all authors have made a significant contribution to the development of the concept, the preparation of the article, read and approved the final version before publication).

Compliance with Ethical Standards

The work complies with the ethical standards of the Helsinki Declaration of the World Medical Association «Ethical Principles of conducting scientific medical research with human participation» as amended in 2008 and the «Rules of Clinical Practice in the Russian Federation» approved by the Order of the Ministry of Health of the Russian Federation dated 06/19/2003.

Введение

Магнитно-резонансная томография (МРТ) является важным инструментом диагностики, динамического наблюдения и оценки эффективности лечения рассеянного склероза (РС), позволяя выявлять активные воспалительные процессы при использовании контрастных средств (КС). Традиционно T1 взвешенные изображения (ВИ) с контрастным усилением считаются золотым стандартом для обнаружения активных очагов демиелинизации при рассеянном склерозе [2, 26]. В последние годы внимание исследователей привлекает режим T2 FLAIR с контрастным усилением, который может увеличить диагностический потенциал в выявлении активных очагов при РС [6, 20]. Также, учитывая эффективное подавление МР-сигнала от ликвора, T2 FLAIR, в том числе после введения контрастного средства, полезен в выявлении патологических изменений вблизи ликворосо-

держащих пространств головного мозга [27]. Наряду с очаговыми поражениями в белом веществе головного мозга гистопатологические и нейровизуализационные исследования демонстрируют наличие изменений в коре и оболочках мозга при рассеянном склерозе. МРТ головного мозга высокого разрешения с контрастным усилением с использованием режима T2 FLAIR является методом неинвазивной диагностики таких изменений [3, 4, 21].

Настоящее исследование направлено на оценку диагностической ценности постконтрастных МРТ-изображений в режиме T2 FLAIR у пациентов с рассеянным склерозом. Сопоставляя результаты, полученные в режимах T2 FLAIR и T1 MPRAGE, исследуются возможности качественной и количественной (на основе индекса контрастности и индекса прироста контрастности) оценки очагов демиелинизации. Дополнительно изучаются характеристики накопления

контрастного средства в зависимости от его типа, а также проводится ROC-анализ с целью оценки прогностической значимости T2 FLAIR в выявлении активных воспалительных изменений.

Цель: оценить роль постконтрастной визуализации в режиме T2 FLAIR в диагностике очагов демиелинизации в веществе головного мозга при рассеянном склерозе.

Материалы и методы

В исследование было включено 60 пациентов в возрасте от 20 до 59 лет с подтвержденным диагнозом рассеянный склероз. Обследование пациентов осуществлялось на базе отдела лучевой диагностики ФГБНУ «Российский центр неврологии и нейронаук». МРТ-сканирование проводилось на двух томографах с различной величиной магнитной индукции: Siemens Magnetom Avanto, 1,5 Тл (n = 30) и Siemens Magnetom Prisma, 3,0 Тл (n = 30). Критериями включения были возраст более 18 лет и установленный диагноз рассеянный склероз. Критерии невключения: наличие более одной области сканирования при МРТ-исследовании, аллергическая реакция на контрастное средство. Критерии исключения: отказ пациента от участия в исследовании (в том числе наличие клаустрофобии), беремен-

ность, обнаружение другой структурной патологии в веществе головного мозга, кроме демиелинизации, повреждение МРТ-данных, наличие некорректируемых артефактов, преждевременное прекращение МРТ-исследования по инициативе пациента.

Протокол МРТ-сканирования головного мозга включал следующие режимы: T2 ВИ, T2 FLAIR, T1 MPRAGE, T2*/SWI, DWI, после введения контрастного средства выполнялись T1 MPRAGE и T2 FLAIR. Порядок получения режимов не был рандомизирован, и все постконтрастные изображения T2 FLAIR были получены после T1 взвешенных изображений. Временная задержка перед проведением режима T1 MPRAGE составляла 10 мин, перед T2 FLAIR — 20 мин. Было использовано контрастное средство гадобутрол в дозе 0,1 ммоль/кг массы тела пациента. Непосредственно анализируемыми режимами были T1 MPRAGE и T2 FLAIR до и после введения контрастного средства.

К методам количественной оценки контрастного усиления в данном исследовании относилось вычисление индекса контрастности (ИК). Сначала был рассчитан ИК в очагах демиелинизации до введения контрастного средства, затем ИК рассчитывался на изображениях, полученных после введения КС:

$$ИК(до) = \frac{ROI(очага)до - ROI(БВ)до}{ROI(БВ)до} ;$$

$$ИК(после) = \frac{ROI(очага)после - ROI(БВ)после}{ROI(БВ)после} .$$

Прирост интенсивности ($\Delta ИК$) был рассчитан по формуле:

$$\Delta ИК = \frac{ROI(очага)после - ROI(БВ)после}{ROI(БВ)после} - \frac{ROI(очага)до - ROI(БВ)до}{ROI(БВ)до} ,$$

где $\Delta ИК$ — прирост интенсивности МР-сигнала после введения контрастного средства, ROI очага до/после — значение интенсивности МР-сигнала в зоне интереса (очаге) до/после введения

контрастного средства, ROI БВ до/после — значение интенсивности МР-сигнала во внешне неизменном белом веществе до/после введения контрастного средства.

Статистическая обработка

Для статистического анализа применялся программный пакет SPSS Statistics версии 26.0 (IBM, США). Нулевая гипотеза отвергалась при уровне значимости $p < 0,05$ (в случае апостериорных попарных сравнений — при скорректированном уровне значимости $padj < 0,05$). Тип распределения количественных переменных оценивался с помощью критерия Колмогорова — Смирнова. Для описания всех количественных переменных использовались медиана и квартили. Для категориальных переменных — частота и доля. Для сравнения 2 связанных групп по количественным переменным с нормальным распределением применялся Т-тест для связанных совокупностей, с ненормальным распределением — тест Вилкоксона. Для сравнения 2 несвязанных групп по количественным переменным с ненормальным распределением применялся тест Манна — Уитни, по категориальным переменным — тест хи-квадрат Пирсона, а при наличии ограничений к его применению — точный критерий Фишера. Для сравнения более 2 несвязанных групп по количественным переменным с ненормальным распределением применялся тест Краскела — Уоллиса. Коррекция на

множественные сравнения выполнялась методом Бонферрони. Диагностическая эффективность режима T2 FLAIR оценивалась по чувствительности, специфичности, прогностической ценности и ROC-анализу с определением оптимального порога ДИК для прогнозирования накопления в режиме T1 MPRAGE.

Результаты

Были получены результаты МРТ-исследований 60 пациентов с подтвержденным диагнозом рассеянный склероз, прошедших сканирование с контрастным усилением на двух томографах с разной величиной магнитной индукции: Siemens Magnetom Avanto, 1,5 Тл и Siemens Magnetom Prisma, 3,0 Тл. Медиана временной задержки после введения КС до выполнения режима T1 MPRAGE составила 13,5 [10; 16] мин, до T2 FLAIR — 22 [20; 25,5] мин. Общая характеристика выборки представлена в табл. 1. Было выявлено 132 очага в различных отделах белого вещества обоих полушарий большого мозга без привязки к пациентам (единица наблюдения — 1 очаг). Выделено 35 (26,5 %) очагов, накапливающих контрастный препарат в режиме T1 MPRAGE — золотой стандарт. Отдельно были рассчитаны индексы контрастности в очагах

Таблица 1

Распределение выборки по демографическим показателям, применяемому контрастному средству и томографам, на которых проводилось обследование

Характеристики		Siemens Magnetom Avanto, 1,5 Тл	Siemens Magnetom Prisma, 3,0 Тл
Число участников	п участников	30	30
Возраст (лет)	Me [Q1; Q3]	41,5 [31; 43]	35,5 [27; 41]
Пол	мужской	п (%) участников	27 (90)
	женский	п (%) участников	3 (10)
Контрастное средство	гадобу-трол	п (%) участников	30 (100)

демиелинизации до и после введения контрастного средства, прирост ИК в режимах T1 MPRAGE и T2 FLAIR, а также распределение очагов по типам контрастного усиления.

При качественной оценке и сравнении очагов в режимах T1 MPRAGE и T2 FLAIR в веществе головного мозга было выделено несколько типов контрастного усиления в режиме T2 FLAIR (рис. 1).

Анализ наличия/отсутствия накопления КС очагами в режимах T1 MPRAGE и T2 FLAIR показал, что очаги с наличием накопления КС в T1 MPRAGE значимо чаще демонстрируют накопление в T2 FLAIR по сравнению с очагами, которые не накапливают в T1 MPRAGE ($p < 0,001$) (табл. 2, рис. 2). Вместе с тем 16,5 % очагов накапливали КС в режиме T2 FLAIR (по данным рас-

чета прироста контрастности после введения КС), при этом не накапливали его в режиме T1 MPRAGE.

При сравнении характера накопления контрастного средства очагами РС в обоих режимах были получены следующие результаты (табл. 3, рис. 3):

- из 35 очагов, накапливающих КС в режиме T1 MPRAGE, 23 (65,7 %) очага имели однородное накопление, 12 (34,2 %) — по типу «кольца» и «полукольца»;
- из 23 очагов, однородно накапливающих КС в режиме T1 MPRAGE, 16 (69,6 %) очагов имели однородный тип накопления КС в режиме T2 FLAIR, а в 5 (21,7 %) случаях накопление КС выявлялось в центральных отделах очага в режиме T2 FLAIR;

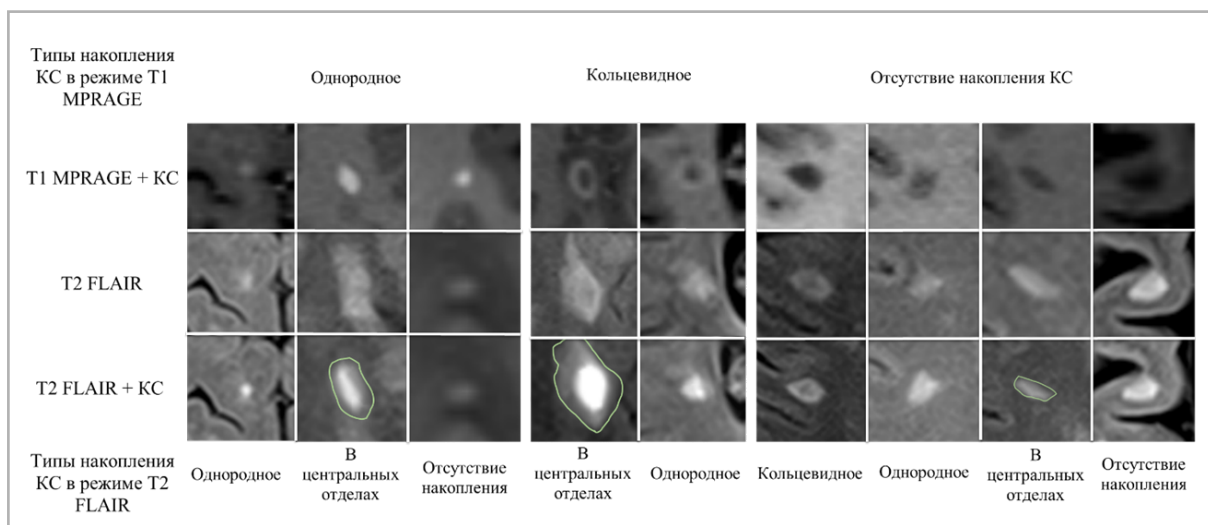


Рис. 1. Типы накопления контрастного средства в режимах T1 MPRAGE и T2 FLAIR в очагах демиелинизации при рассеянном склерозе

Таблица 2

Сравнение накопления контрастного средства в режимах T1 MPRAGE и T2 FLAIR

Оцениваемые показатели		Накопление в T1		Уровень значимости (p)
		Есть (n = 35)	Нет (n = 97)	
T2 FLAIR: наличие накопления КС	Есть, n (%)	33 (94,3)	16 (16,5)	< 0,001
	Нет, n (%)	2 (5,7)	81 (83,5)	
T2 FLAIR: ДИК, Me [Q1; Q3]		0,02 [-0,02 ... 0,06]	0,44 [0,21 ... 0,77]	< 0,001

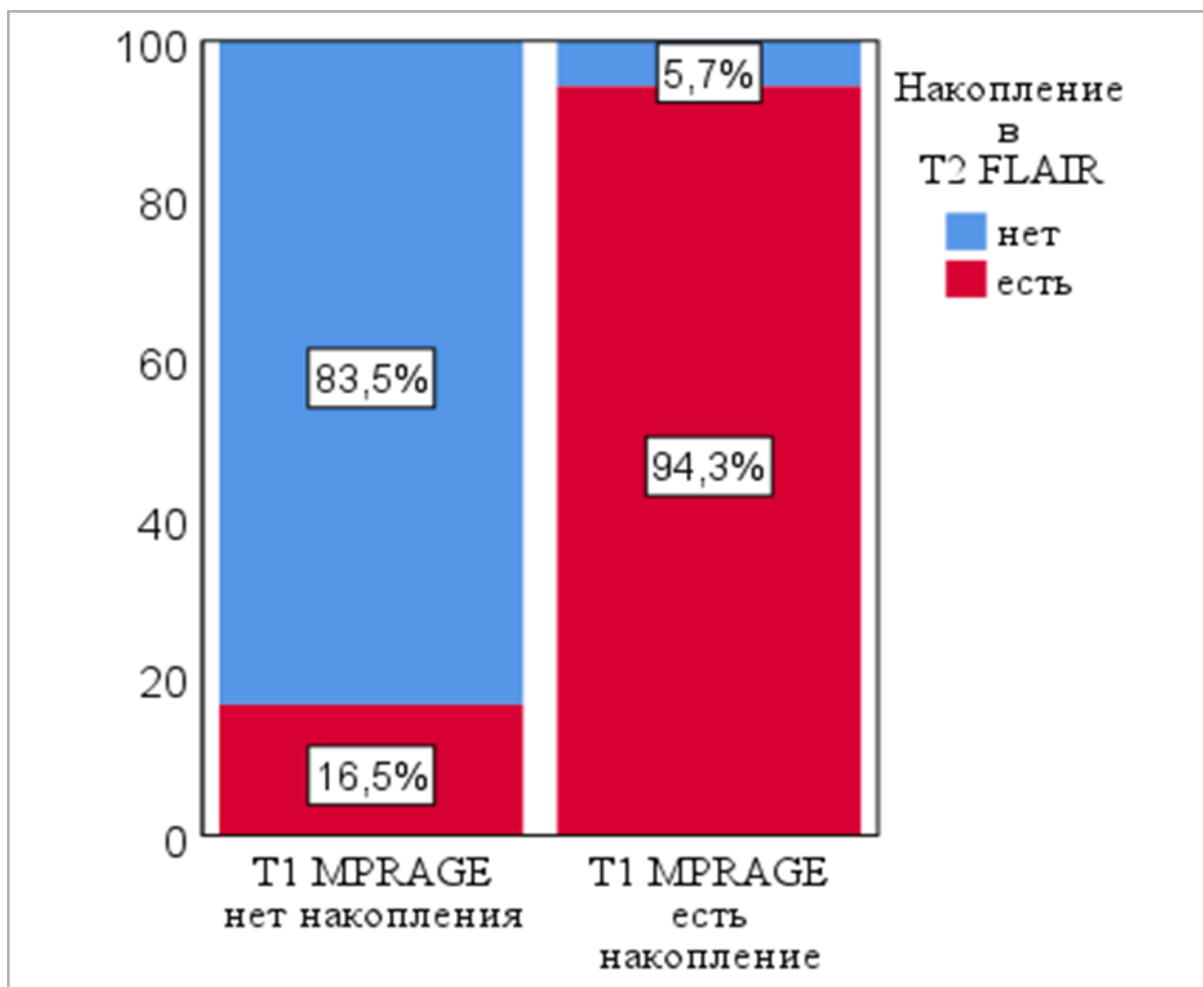


Рис. 2. Контрастное усиление в очагах в режимах T1 MPRAGE и T2 FLAIR

Таблица 3

Сравнение характера накопления контрастного средства в очагах РС в режимах T1 MPRAGE и T2 FLAIR

		Накопление в T1 MPRAGE			Уровень значимости (p)
		Однородное (n = 23)	«Полу/кольцо» (n = 12)	Нет (n = 97)	
Накопление в T2 FLAIR	Однородное, n (%)	16 (69,6)	6 (50,0)	9 (9,3)	< 0,001
	Полу-/кольцо, n (%)	0 (0,0)	0 (0,0)	4 (4,1)	
	В центр. отделах, n (%)	5 (21,7)	6 (50,0)	3 (3,1)	
	Нет, n (%)	2 (8,7)	0 (0,0)	81 (83,5)	
T2 FLAIR: ДИК, Me [Q1; Q3]		0,36 [0,18 ... 0,45]	1,16 [0,66 ... 1,36]	0,02 [-0,02 ... 0,06]	< 0,001

— из 12 очагов, накапливающих КС в режиме T1 MPRAGE по типу «кольца» или «полукольца», 6 (50,0 %)

очагов имели однородный тип накопления КС в режиме T2 FLAIR, а еще в 6 (50,0 %) случаях накопление

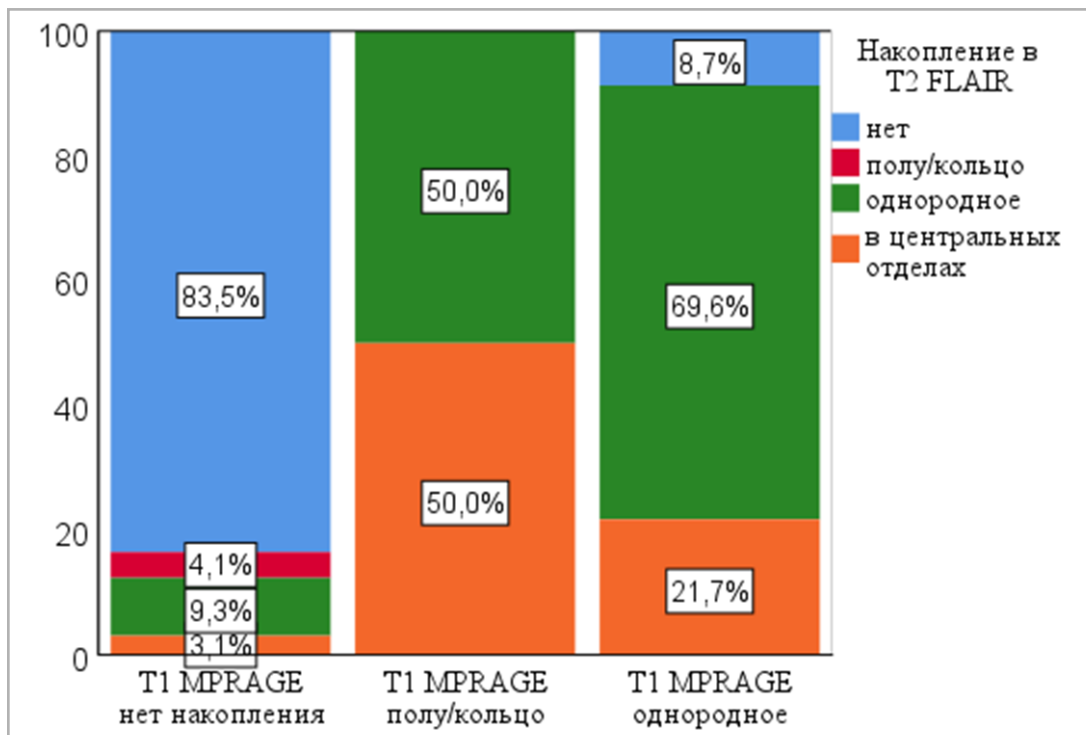


Рис. 3. Сравнение характера накопления контрастного средства очагами демиелинизации в режимах T1 MPRAGE и T2 FLAIR

- КС наблюдалось в центральных отделах очага в режиме T2 FLAIR;
- из 97 очагов, не накапливающих КС в режиме T1 MPRAGE, 81 (83,5 %) очаг также не накапливал КС в режиме T2 FLAIR, однако, по данным ДИК, 9 (9,3 %) очагов однородно накапливали КС, 4 (4,1 %) очага – по типу «кольца» или «полукольца», а 3 (3,1 %) – в центральных отделах очага в режиме T2 FLAIR.

Таким образом, очаги с разными типами накопления КС в режиме T1 MPRAGE значимо различались между собой по характеру накопления в режи-

ме T2 FLAIR, а также по ДИК в режиме T2 FLAIR ($p < 0,001$ в обоих случаях, табл. 4, рис. 3). Вместе с тем апостериорные попарные сравнения групп показали, что значимыми были только различия между очагами, накапливающими и не накапливающими в режиме T1 MPRAGE ($padj < 0,001$ во всех случаях).

В настоящей работе была исследована возможность использования качественной оценки накопления КС в режиме T2 FLAIR для прогнозирования накопления КС в режиме T1 MPRAGE (табл. 4).

Таблица 4

Прогнозирование контрастного усиления в режиме T1 MPRAGE по наличию накопления КС в режиме T2 FLAIR

	Золотой стандарт T1 MPRAGE: есть накопление	Золотой стандарт T1 MPRAGE: нет накопления
T2 FLAIR: есть накопление	33 (true-positive, TP)	16 (false-positive, FP)
T2 FLAIR: нет накопления	2 (false-negative, FN)	81 (true-negative, TN)

- Чувствительность T2 FLAIR = $TP / (TP + FN) = 33/35 = 94,3 \%$.
- Специфичность T2 FLAIR = $TN / (TN + FP) = 81/97 = 83,5 \%$.
- Положительная прогностическая ценность T2 FLAIR = $TP / (TP + FP) = 33/49 = 67,3 \%$.
- Отрицательная прогностическая ценность T2 FLAIR = $TN / (TN + FN) = 81/83 = 97,6 \%$.
- Точность T2 FLAIR = $(TP + TN) / (TP + TN + FP + FN) = 114/132 = 86,4 \%$.

С помощью ROC-анализа исследована возможность использования ДИК в режиме T2 FLAIR для прогнозирования накопления в режиме T1 MPRAGE. Отличия ROC-кривой от диагональной опорной линии оказались статистически значимыми ($p < 0,001$). Площадь под кривой [95 % доверительный интервал] составила 0,934 [0,875; 0,994], что соответствует отличной прогностической способности (рис. 4). Оптимальное пороговое значение по индексу Йодена

определено на уровне 0,10. При прогнозировании наличия накопления КС в режиме T1 MPRAGE в случае ДИК в режиме T2 FLAIR $\geq 0,10$ чувствительность и специфичность составляют 94,3 и 82,5 % соответственно.

Обсуждение

Магнитно-резонансная томография прочно вошла в ежедневную клинико-диагностическую практику и представляет собой основополагающий метод диагностики, дифференциальной диагностики и мониторинга рассеянного склероза, в том числе с использованием контрастных средств.

Механизм контрастирования с использованием гадолинийсодержащих магнитно-резонансных контрастных средств заключается в сокращении времен T1 и T2 релаксации, что увеличивает или уменьшает интенсивность МР-сигнала, повышая различия между нормальной тканью и патологическими изменениями. Контраст-

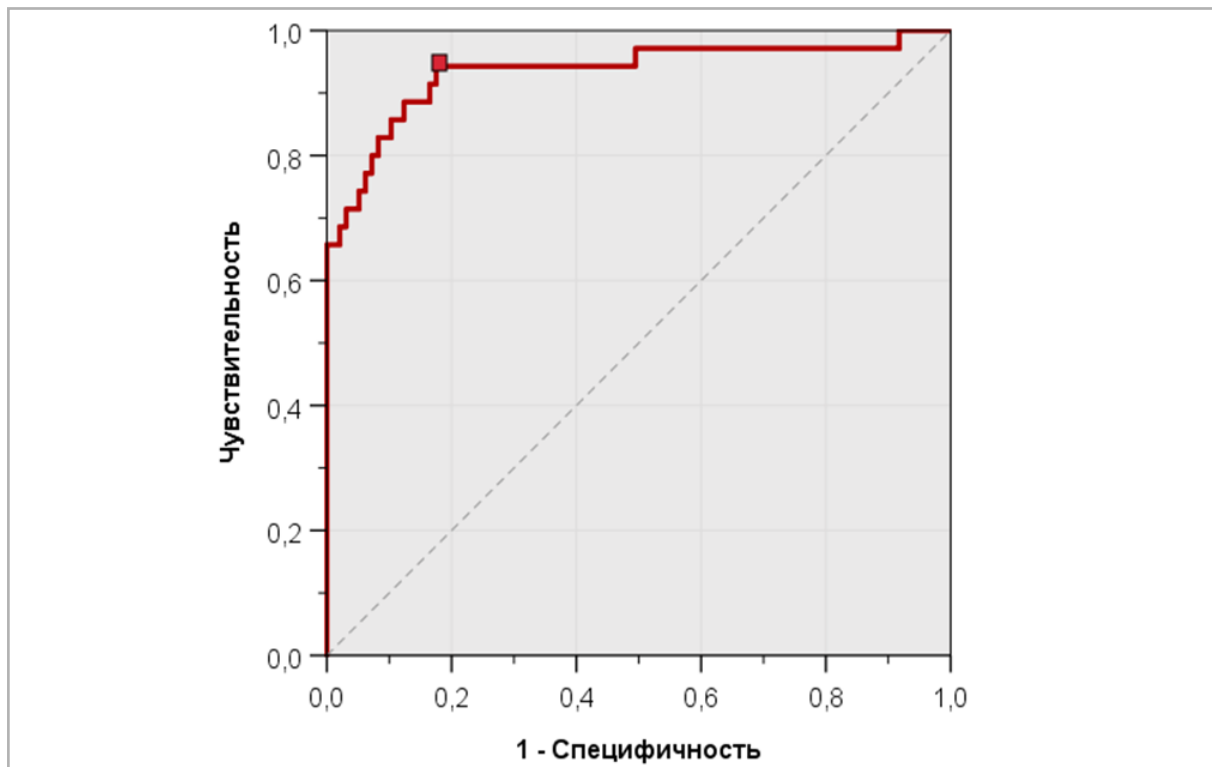


Рис. 4. ROC-кривая для ДИК в режиме T2 FLAIR при прогнозировании накопления КС в режиме T1 MPRAGE. Красная точка соответствует характеристикам выбранного порогового значения

ное усиление обусловлено патофизиологическими механизмами, такими как нарушение сосудистой проницаемости, изменение кровотока, неоангиогенез, нарушение проницаемости гематоэнцефалического барьера [1]. Чувствительность к сокращению времени T1 релаксации в режиме T2 FLAIR при введении гадолинийсодержащих контрастных средств обеспечивает доступность визуализации патологически измененной интенсивности МР-сигнала, так как процессы релаксации (T1 и T2) происходят параллельно [7, 10]. Кроме того, режим T2 FLAIR обладает высокой чувствительностью к низким концентрациям контрастного средства по сравнению с T1 взвешенными изображениями (Parmar et al., 2006; Lee et al., 2016; Park et al., 2018; Ahn et al., 2022) [5, 17, 22, 23].

Накопление КС в очагах демиелинизации при РС связано с нарушением проницаемости гематоэнцефалического барьера в связи с наличием локального активного воспалительного процесса, «активность» очага ограничивается 6–8 нед. Выделяют несколько типов очагов при РС: ранние и поздние «активные» характеризуются разным типом накопления контрастного средства – однородным (ранние острые), кольцевидным (поздние острые); хронические очаги, в свою очередь, делятся на активные и неактивные, визуальные различия между которыми обусловлены потенциальным увеличением очагов со временем (хронические активные). В хронических очагах отсутствует накопление КС [8, 12, 14, 16].

Золотым стандартом оценки активности очагов демиелинизации при проведении МРТ головного мозга являются T1 взвешенные изображения. В последние десятилетия уделяется внимание постконтрастной визуализации в режиме T2 FLAIR при различных поражениях центральной нервной системы.

Исследования показывают, что использование режима T2 FLAIR с контрастным усилением способно предоставить не только дополнительную, но иногда и основную информацию в различных диагностических ситуациях, в том числе при РС [6, 10, 18, 25].

Неоднократно в мировых исследованиях упоминается, что патологические изменения в головном мозге, накапливающие контрастное средство в режиме T1 ВИ, могут также демонстрировать подобное и в режиме T2 FLAIR (Essig et al., 1999; Tsuchiya et al., 2001; Melhem et al., 1998) [11, 19, 24]. В нашем исследовании очаги, которые накапливали КС в режиме T1 MPRAGE (n = 35), также в большинстве случаев накапливали КС и в режиме T2 FLAIR (n = 33). Отсутствие накопления КС в двух очагах в режиме T2 FLAIR может быть связано с техническими параметрами сканирования и/или малыми размерами очагов.

Нами были оценены и сопоставлены типы накопления контрастного средства в очагах демиелинизации при рассеянном склерозе в режимах T1 MPRAGE и T2 FLAIR: выделено несколько паттернов контрастного усиления в режиме T2 FLAIR относительно золотого стандарта, чего не встречалось в мировой литературе.

Среди очагов, в которых был выявлен «кольцевидный» тип накопления контрастного средства в T1 MPRAGE, отмечалось два варианта контрастного усиления в режиме T2 FLAIR: однородное и в центральных отделах очага, что может быть связано с временной задержкой. Медиана задержки перед T2 FLAIR составила 22 [20; 25,5] мин. Подобное предположение освещается в исследовании Gaitán et al. (2011), где были оценены очаги контрастирования при РС в режиме T1 ВИ в течение 30 и 65 мин. Исследователями было показано, что в очагах с кольцевидным типом накопления КС с течением времени в 82 % случаев контрастирование становилось

однородным. Но также были и те очаги, которые с течением времени не меняли характеристики накопления КС в режиме T1 ВИ (оставались кольцевидными). Представляется возможным экстраполировать эти данные на полученные нами результаты: вероятно, однородный тип накопления контрастного средства в режиме T2 FLAIR может быть связан с большей временной задержкой [13]. Наряду с этим такая диссоциация также может быть связана с высокой чувствительностью режима T2 FLAIR к низким концентрациям контрастного средства (Lee et al., 2016; Park et al., 2018; Ahn et al., 2022) [5, 17, 22]. Возможно, степень изменения интенсивности МР-сигнала и характер контрастирования в режиме T2 FLAIR может зависеть от выраженности нарушения гематоэнцефалического барьера. Для уточнения этой гипотезы потребуются экспериментальные работы, учитывающие концентрацию гадолинийсодержащих контрастных средств в веществе мозга.

Результаты настоящего исследования подтверждают высокую диагностическую ценность постконтрастных изображений в режиме T2 FLAIR при выявлении очагов рассеянного склероза. В частности, 16,5 % очагов, не демонстрировавших накопление контрастного средства в режиме T1 MPRAGE, проявляли накопление КС в T2 FLAIR (по данным ДИК). Возможно, данные изменения могут отражать возрастные характеристики очагов, связанные с завершением активного воспалительного процесса. Данный феномен требует дальнейшего изучения. Не исключено, что после прекращения контрастирования очагов в режиме T1 ВИ в режиме T2 FLAIR все еще может регистрироваться повышение интенсивности МР-сигнала после введения КС (по ДИК) ввиду его высокой чувствительности к низким концентрациям контрастного средства и нарушению проницаемости гематоэнцефалического барьера [5, 9, 17, 22].

В исследованиях, посвященных выявлению лимфоидных третичных фолликулов на поверхности головного мозга при рассеянном склерозе, была показана ведущая роль постконтрастных МРТ-изображений в режиме T2 FLAIR [15]. В нашем исследовании оценка подобных патологических изменений не проводилась.

Наш анализ также выявил, что ДИК (прирост интенсивности МР-сигнала после введения контрастного средства) в режиме T2 FLAIR является значимым предиктором наличия накопления контрастного вещества в T1 MPRAGE. Пороговое значение ДИК $\geq 0,10$ обеспечивало чувствительность 94,3 % и специфичность 82,5 % при прогнозировании накопления в T1 MPRAGE. В доступной отечественной и мировой литературе подобного анализа выявлено не было.

Выводы

Таким образом, включение режима T2 FLAIR после введения контрастного средства в стандартный протокол МРТ-исследования пациентов является важным аспектом диагностики рассеянного склероза с целью получения дополнительной информации. Для оптимизации протокола требуется дальнейшее изучение применения постконтрастной визуализации в режиме T2 FLAIR и расширение оцениваемых показателей на большей когорте пациентов.

Список источников/ References

1. Кармазановский Г. Г., Шимановский Н. Л. Контрастные средства для лучевой диагностики: руководство. М.: ГЭОТАР-Медиа, 2022. 672 с.
Karamazanovsky G. G., Shimanovsky N. L. Contrast Agents for Radiological Diagnostics. Handbook. Moscow: GEOTAR-Media, 2022. 672 p. (In Russ.).
2. Кротенкова И. А., Брюхов В. В., Коновалов Р. Н., Захарова М. Н., Кротенкова М. В. Магнитно-резонансная томография в дифференциальной диагно-

- стике рассеянного склероза и других демиелинизирующих заболеваний // Вестник рентгенологии и радиологии. 2019;100(4):229-36.
<https://doi.org/10.20862/0042-4676-2019-100-4-229-236>
- Krotenkova I. A., Bryukhov V. V., Konovalov R. N., Zakharova M. N., Krotenkova M. V. Magnetic resonance imaging in the differential diagnosis of multiple sclerosis and other demyelinating diseases. *J. of Radiology and Nuclear Medicine*. 2019; 100(4):229-36. (In Russ.).
<https://doi.org/10.20862/0042-4676-2019-100-4-229-236>
3. Absinta M., Vuolo L., Rao A., Nair G., Sati P., Cortese I. C., Ohayon J., Fenton K., Reyes-Mantilla M. I., Maric D., Calabresi P. A., Butman J. A., Pardo C. A., Reich D. S. Gadolinium-based MRI characterization of leptomeningeal inflammation in multiple sclerosis. *Neurology*. 2015;85(1):18-28.
<https://doi.org/10.1212/WNL.0000000000001587>
 4. Absinta M., Reich D. S. Imaging of meningeal inflammation should become part of the routine MRI protocol – Yes. *Multiple Sclerosis J*. 2019;25(3):330-331.
<https://doi.org/10.1177/1352458518794082>
 5. Ahn S. J., Taoka T., Moon W. J., Naganawa S. Contrast-Enhanced Fluid-Attenuated Inversion Recovery in Neuroimaging: A Narrative Review on Clinical Applications and Technical Advances. *J. Magn Reson Imaging*. 2022;56(2):341-353.
<https://doi.org/10.1002/jmri.28117>
 6. Bagheri M. H., Meshksar A., Nabavizadeh S. A., Borhani-Haghighi A., Ashjzadeh N., Nikseresht A. R. Diagnostic value of contrast-enhanced fluid-attenuated inversion-recovery and delayed contrast-enhanced brain MRI in multiple sclerosis. *Acad Radiol*. 2008;15(1):15-23.
<https://doi.org/10.1016/j.acra.2007.07.022>
 7. Westbrook C., Talbot J. MRI in practice. Description: Fifth edition. Hoboken, NJ: Wiley, 2018. ISBN 9781119391999
 8. Dal-Bianco A., Grabner G., Kronnerwetter C., Weber M., Höftberger R., Berger T., Auff E., Leutmezer F., Trattinig S., Lassmann H., Bagnato F., Hametner S. Slow expansion of multiple sclerosis iron rim lesions: pathology and 7 T magnetic resonance imaging. *Acta Neuropathol*. 2017; 133(1):25-42.
<https://doi.org/10.1007/s00401-016-1636-z>
 9. Dickinson P. J., Jones-Woods S., Cissell D. D. Abrogation of fluid suppression in intracranial postcontrast fluid-attenuated inversion recovery magnetic resonance imaging: A clinical and phantom study. *Vet Radiol Ultrasound*. 2018;59(4):432-443. <https://doi.org/10.1111/vru.12605>
 10. Ercan N., Gultekin S., Celik H., Tali T. E., Oner Y. A., Erbas G. Diagnostic value of contrast-enhanced fluid-attenuated inversion recovery MR imaging of intracranial metastases. *AJNR Am. J. Neuro-radiol*. 2004;25(5):761-5.
 11. Essig M., Knopp M. V., Schoenberg S. O., Hawighorst H., Wenz F., Debus J., van Kaick G. Cerebral gliomas and metastases: assessment with contrast-enhanced fast fluid-attenuated inversion-recovery MR imaging. *Radiology*. 1999; 210(2):551-7.
<https://doi.org/10.1148/radiology.210.2.r99ja22551>
 12. Frischer J. M., Weigand S. D., Guo Y., Kale N., Parisi J. E., Pirko I., Mandrekar J., Bramow S., Metz I., Brück W., Lassmann H., Lucchinetti C. F. Clinical and pathological insights into the dynamic nature of the white matter multiple sclerosis plaque. *Ann Neurol*. 2015;78(5):710-21. <https://doi.org/10.1002/ana.24497>
 13. Gaitán M. I., Shea C. D., Evangelou I. E., Stone R. D., Fenton K. M., Bielekova B., Massacesi L., Reich D. S. Evolution of the blood-brain barrier in newly forming multiple sclerosis lesions. *Ann Neurol*. 2011; 70(1):22-9.
<https://doi.org/10.1002/ana.22472>
 14. Harrison D. M., Li X., Liu H., Jones C. K., Caffo B., Calabresi P. A., van Zijl P.

- Lesion Heterogeneity on High-Field Susceptibility MRI Is Associated with Multiple Sclerosis Severity. *AJNR Am. J. Neuroradiol.* 2016;37(8):1447-53.
<https://doi.org/10.3174/ajnr.A4726>
15. Harrison D. M., Allette Y. M., Zeng Y., Cohen A., Dahal S., Choi S., Zhuo J., Hua J. Meningeal contrast enhancement in multiple sclerosis: assessment of field strength, acquisition delay, and clinical relevance. *PLoS One.* 2024;19(5):e0300298. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0300298>
 16. Kuhlmann T., Moccia M., Coetzee T., Cohen J. A., Correale J., Graves J., Marrie R. A., Montalban X., Yong V. W., Thompson A. J., Reich D. S. International Advisory Committee on Clinical Trials in Multiple Sclerosis. Multiple sclerosis progression: time for a new mechanism-driven framework. *Lancet Neurol.* 2023;22(1):78-88.
[https://doi.org/10.1016/S1474-4422\(22\)00289-7](https://doi.org/10.1016/S1474-4422(22)00289-7)
 17. Lee E. K., Lee E. J., Kim S., Lee Y. S. Importance of Contrast-Enhanced Fluid-Attenuated Inversion Recovery Magnetic Resonance Imaging in Various Intracranial Pathologic Conditions. *Korean J. Radiol.* 2016;17(1):127-41.
<https://doi.org/10.3348/kjr.2016.17.1.127>
 18. Mathews V. P., Caldemeyer K. S., Lowe M. J., Greenspan S. L., Weber D. M., Ulmer J. L. Brain: gadolinium-enhanced fast fluid-attenuated inversion-recovery MR imaging. *Radiology.* 1999;211(1):257-63.
<https://doi.org/10.1148/radiology.211.1.r99mr25257>
 19. Melhem E. R., Bert R. J., Walker R. E. Usefulness of optimized gadolinium-enhanced fast fluid-attenuated inversion recovery MR imaging in revealing lesions of the brain. *AJR Am. J. Roentgenol.* 1998; 171(3):803-7.
<https://doi.org/10.2214/ajr.171.3.9725320>
 20. Mustafa W., Ali S., Elgendy N., Salama S., Sorogy L., Mohsen M. Role of contrast-enhanced FLAIR MRI in diagnosis of intracranial lesions. *Egypt J. Neurol. Psychiatry Neurosurg.* 2021; 57:108.
<https://doi.org/10.1186/s41983-021-00360-x>
 21. Okar S. V., Dieckhaus H., Beck E. S., Gaitán M. I., Norato G., Pham D. L., Absinta M., Cortese I. C., Fletcher A., Jacobson S., Nair G., Reich D. S. Highly Sensitive 3-Tesla Real Inversion Recovery MRI Detects Leptomeningeal Contrast Enhancement in Chronic Active Multiple Sclerosis. *Invest Radiol.* 2024;59(3):243-251.
<https://doi.org/10.1097/RLI.0000000000001011>
 22. Park Y. W., Ahn S. J. Comparison of Contrast-Enhanced T2 FLAIR and 3D T1 Black-Blood Fast Spin-Echo for Detection of Leptomeningeal Metastases. *Investigative Magnetic Resonance Imaging.* 2018;22(2):86-93.
<https://doi.org/10.13104/imri.2018.22.2.86>
 23. Parmar H., Sitoh Y. Y., Anand P., Chua V., Hui F. Contrast-enhanced flair imaging in the evaluation of infectious leptomeningeal diseases. *Eur. J. Radiol.* 2006;58(1):89-95.
<https://doi.org/10.1016/j.ejrad.2005.11.012>
 24. Tsuchiya K., Katase S., Yoshino A., Hachiya J. FLAIR MR imaging for diagnosing intracranial meningeal carcinomatosis. *AJR Am. J. Roentgenol.* 2001;176(6): 1585-8.
<https://doi.org/10.2214/ajr.176.6.1761585>
 25. Tsuchiya K., Katase S., Yoshino A., Hachiya J. Pre- and postcontrast FLAIR MR imaging in the diagnosis of intracranial meningeal pathology. *Radiat Med.* 2000;18(6):363-8.
 26. Barkhof F., Reich D. S., Oh J., Rocca M. A., Li D. K. B., Sati P., Azevedo C. J., Bagnato F., Calabresi P. A., Ciccarelli O., Dwyer M. G., DeLuca G. C., De Stefano N., Enzinger C., Filippi M., Granziera C., Halper J., Henry R. G., Gasperini C., Gauthier S., Kappos L., Laule C., New-

some S. D., Montalban X., Morrow S. A., Schoonheim M. M., Sicotte N., Toosy A., Wilken J., Yousry T., Sastre-Garriga J., Traboulsee A., Ontaneda D., Rovira À. Magnetic Resonance Imaging Network in Multiple Sclerosis; Consortium of Multiple Sclerosis Centers; North American Imaging in Multiple Sclerosis Cooperative MRI guidelines working group. 2024 MAGNIMS-CMSC-NAIMS consensus recommendations on the use of MRI for

the diagnosis of multiple sclerosis. *Lancet Neurol.* 2025;24(10):866-879.

[https://doi.org/10.1016/S1474-4422\(25\)00304-7](https://doi.org/10.1016/S1474-4422(25)00304-7)

27. Zurawski J., Lassmann H., Bakshi R. Use of Magnetic Resonance Imaging to Visualize Leptomeningeal Inflammation in Patients With Multiple Sclerosis: A Review. *JAMA Neurol.* 2017;74(1):100-109. <https://doi.org/10.1001/jamaneurol.2016.4237>

Сведения об авторах / Information about the authors

Стегура Диана Сергеевна, врач-рентгенолог, аспирант отдела лучевой диагностики ФГБНУ «Российский центр неврологии и нейронаук», Москва, Россия.

Вклад автора: разработка концепции – выполнение исследования, формирование идеи, цели и написание текста.

Stegura Diana Sergeevna, radiologist, Graduate student of the Department of Neuroradiology, Russian Center of Neurology and Neurosciences, Moscow, Russia.

Author's contribution: concept development – formation of an idea, goals and writing a text.

Коновалов Родион Николаевич, кандидат медицинских наук, врач-рентгенолог, старший научный сотрудник отдела лучевой диагностики ФГБНУ «Российский центр неврологии и нейронаук», Москва, Россия.

Вклад автора: утверждение окончательного варианта публикации – принятие ответственности за все аспекты работы, целостность всех частей статьи и ее окончательный вариант.

Konovalov Rodion Nikolaevich, Ph. D. Med., radiologist, Senior researcher, Department of Neuroradiology Russian Center of Neurology and Neurosciences, Moscow, Russia.

Author's contribution: approval of the final version of the publication – taking responsibility for all aspects of the work, the integrity of all parts of the article and its final version.

Бердалина Ирина Александровна, статистик отдела подготовки кадров высшей квалификации Института медицинского образования и профессионального развития ФГБНУ «Российский центр неврологии и нейронаук», Москва, Россия.

Вклад автора: статистический анализ данных.

Berdalina Irina Alexandrovna, Statistician, Department of Higher Qualification Training, Institute of Medical Education and Professional Development Russian Center of Neurology and Neurosciences, Moscow, Russia.

Author's contribution: statistical analysis of the data.

Брюхов Василий Валерьевич, кандидат медицинских наук, врач-рентгенолог, старший научный сотрудник отдела лучевой диагностики ФГБНУ «Российский центр неврологии и нейронаук», Москва, Россия.

Вклад автора: утверждение окончательного варианта публикации – принятие ответственности за все аспекты работы, целостность всех частей статьи и ее окончательный вариант.

Bryukhov Vasily Valerievich, Ph. D. Med., radiologist, Senior researcher, Department of Neuroradiology Russian Center of Neurology and Neurosciences, Moscow, Russia.

Author's contribution: approval of the final version of the publication – taking responsibility for all aspects of the work, the integrity of all parts of the article and its final version.

Кротенкова Марина Викторовна, доктор медицинских наук, главный научный сотрудник, доцент, врач-рентгенолог, руководитель отдела лучевой диагностики ФГБНУ «Российский центр неврологии и нейронаук», Москва, Россия.

Вклад автора: утверждение окончательного варианта публикации – принятие ответственности за все аспекты работы, целостность всех частей статьи и ее окончательный вариант.

Krotenkova Marina Viktorovna, M. D. Med., chief researcher, associate professor, radiologist, Head of Department of Neuroradiology, Russian Center of Neurology and Neurosciences, Moscow, Russia.

Author's contribution: approval of the final version of the publication – taking responsibility for all aspects of the work, the integrity of all parts of the article and its final version.

Статья поступила в редакцию 08.08.2025;
одобрена после рецензирования 28.09.2025;
принята к публикации 29.09.2025.

The article was submitted 08.08.2025;
approved after reviewing 28.09.2025;
accepted for publication 29.09.2025.