НАУЧНЫЙ ОБЗОР

МАГНИТНО-РЕЗОНАНСНАЯ ТОМОГРАФИЯ В ВИЗУАЛИЗАЦИИ ЗРИТЕЛЬНЫХ НЕРВОВ

Брюхов В.В.[1], Матросова М.С. [1], Елисеева Д.Д. [1], Шеремет Н.Л.[2], Кротенкова М.В.[1]

1 – ФГБНУ Научный центр неврологии. г. Москва, Россия.
2 – ФГБНУ «Научно-исследовательский институт глазных болезней им. М.М. Краснова». г. Москва, Россия.

Визуализация зрительных нервов с помощью магнитно-резонансной томографии (МРТ) на сегодняшний день остается актуальной задачей и предметом для дискуссии среди врачей-рентгенологов. Отсутствие общепринятого стандартизированного МРТ-протокола зрительной системы головного мозга в сочетании с относительно малыми размерами её структурных элементов, таких как зрительные нервы, хиазма и зрительные тракты, значительно затрудняет их визуализацию, а выполнения рутинной МРТ головного мозга недостаточно для достоверной оценки патологических изменений этих структур.

В данной статье рассматриваются нормальная МРТ-анатомия зрительных путей головного мозга, существующие методики МРТ для их оценки, а также МРТ-протокол для лучшей визуализации структур зрительной системы головного мозга.

Ключевые слова: магнитно-резонансная томография, МРТ, зрительные нервы, зрительные пути, МРТ орбит, МРТ-протокол.

Контактный автор: Матросова М.С., e-mail: kmari-s@yandex.ru

Для цитирования: Брюхов В.В., Матросова М.С., Елисеева Д.Д, Шеремет Н.Л., Кротенкова М.В. Магнитно-резонансная томография в визуализации зрительных нервов. REJR 2025; 15(4):184-193. DOI: 10.21569/2222-7415-2025-15-4-184-193.

Статья получена: 14.11.24 Статья принята: 26.03.25

MAGNETIC RESONANCE IMAGING IN OPTIC NERVES EVALUATION

Bryukhov V.V.[1], Matrosova M.S.[1], Eliseeva D.D.[1], Sheremet N.L.[2], Krotenkova M.V.[1]

1 – Research Center of Neurology.
2 – M.M. Krasnov Research Institute of Eye Diseases. Moscow, Russia.

Magnetic resonance imaging (MRI) assessment of the visual system remains a challenging task and a subject of debate among radiologists. The absence of a standardized MR-protocol for examining the brain's visual system, combined with the relatively small size of its structural elements such as optic nerves, chiasm, and optic tracts, significantly complicates their visualization. Furthermore, routine brain MR-examination is insufficient for reliable assessment of pathologies affecting these structures.

This article reviews the normal MR-anatomy of the visual pathways of the brain, analyzes existing MRI techniques for their assessment, and proposes an MR-protocol for improved visualization of the visual system structures.

Keywords: magnetic resonance imaging, MRI, optic nerves, optic pathways, orbits MRI, MR-protocol.

Corresponding author: Matrosova M.S., e-mail: kmari-s@yandex.ru

For citation: Bryukhov V.V., Matrosova M.S., Eliseeva D.D., Sheremet N.L., Krotenkova M.V. Magnetic resonance imaging in optic nerves evaluation. REJR 2025; 15(4):184-193. DOI: 10.21569/2222-7415-2025-15-4-184-193.

Received: **14.11.24** **Accepted:** **26.03.25**

Визуализация структур зрительной системы головного мозга является важной диагностической задачей в клинической практике. Адекватная оценка анатомического состояния зрительных нервов, хиазмы, зрительных трактов имеет решающее значение для своевременной диагностики и мониторинга широкого спектра патологических состояний, поражающих зрительные пути [1, 2, 3].

На протяжении последних лет были достигнуты значительные успехи в разработке специализированных импульсных последовательностей МРТ, направленных на улучшение визуализации зрительных путей и позволяющих получать более детальную информацию об анатомии и функциональных связях зрительной системы in vivo [4]. Тем не менее, несмотря на существующие рекомендации экспертных сообществ относительно МРТ-протоколов орбит для оценки зрительных нервов, на сегодняшний день отсутствует общепринятый стандартизированный МРТ-протокол зрительных путей, а стандартного протокола сканирования головного мозга недостаточно для детальной и точной оценки состояния зрительной системы [5, 6, 7]. Это обусловлено необходимостью использования специфического наклона срезов, отличающегося от такового при МРТ головного мозга, а также потребностью в меньшей толщине срезов из-за относительно малого размера анатомических структур зрительной системы. Кроме того, к сложностям МРТ-визуализации зрительных структур относятся их расположение на границе разных сред (ликвор, жировая клетчатка, костные структуры) и возможное наличие артефактов от движения глазных яблок и пульсации ликвора [8, 9]. При этом важно учесть все эти параметры без потери качества изображений и существенного увеличения времени МРТ-сканирования.

Оптимизация МРТ-протокола зрительных нервов должна учитывать не только технические аспекты получения изображений, но и клинические задачи, стоящие перед врачами-рентгенологами, неврологами и офтальмологами для повышения диагностической точности при выявлении различных патологий зрительной системы [10]. Среди заболеваний, требующих тщательной МРТ-оценки зрительных путей, наиболее распространенными являются такие демиелинизирующие заболевания центральной нервной системы (ЦНС), как рассеянный склероз (РС), заболевания спектра оптиконейромиелита (ЗСОНМ) и заболевания, ассоциированные с антителами к миелинолигодендроцитарному гликопротеину (МОГ). Также встречаются экстраневральные и интраневральные объемные образования, ишемические поражения зрительных нервов и наследственные оптические нейропатии (например, наследственная оптическая нейропатия Лебера, аутосомно-рецессивная оптическая нейропатия) [2, 11-15]. Разработка оптимального протокола МРТ зрительных нервов и зрительных путей позволила бы улучшить диагностику и мониторинг этих заболеваний.

В данной статье мы рассмотрим современные возможности метода МРТ в оценке зрительных путей, проанализируем существующие подходы к оптимизации протоколов МРТ-сканирования и обсудим перспективные направления развития этой области нейровизуализации.

Анатомия зрительных путей.

Анатомия зрительной системы представляет собой сложный комплекс структур, обеспечивающих передачу зрительной информации от сетчатки глаза к затылочной коре (корковые зрительные центры). Зрительные пути состоят из нескольких основных частей: зрительных нервов, хиазмы, зрительных трактов, латеральных коленчатых тел и зрительной лучистости [1, 9].

Зрительные нервы, являясь второй парой черепно-мозговых нервов, тем не менее, относятся не к периферической нервной системе, а представляют собой продолжение центральной нервной системы. Как и другие проводящие пути в составе ЦНС, волокна зрительных нервов миелинизированы олигодендроцитами, в то время как в периферической нервной системе, напротив, миелиновые оболочки вокруг аксонов формируются шванновскими клетками [1, 16, 17]. Этот важный анатомический факт объясняет некоторые особенности поражения зрительных

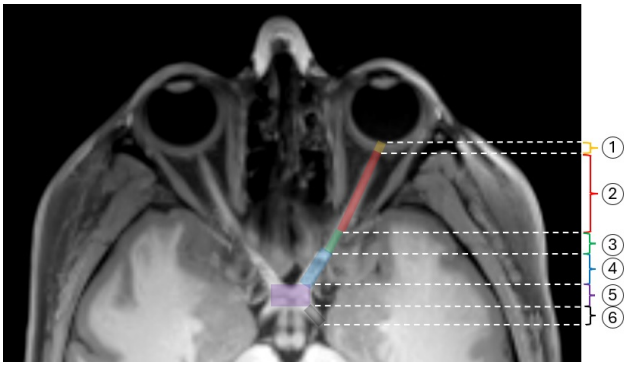

Рис. 1 (Fig. 1)

Рис. 1. МРТ, аксиальная плоскость.

Анатомия зрительных путей: 1-4 – сегменты зрительного нерва (1 – интраокулярный, 2 – интраорбитальный, 3 – интраканаликулярный, 4 – интракраниальный); 5 – хиазма; 6 – зрительный тракт.

Fig. 1. MRI, axial plane.

Anatomy of the optic pathways: 1-4 – segments of the optic nerve (1 – intraocular, 2 – intraorbital, 3 – intracanalicular, 4 – intracranial); 5 – optic chiasm; 6 – optic tract.

нервов при различных патологических процессах, затрагивающих ЦНС, в частности, при демиелинизирующих заболеваниях [2].

Кроме того, зрительные нервы, так же как и другие структуры ЦНС, окружены тремя оболочками: продолжениями твердой (дуральной), паутинной (арахноидальной) и мягкой (пиальной) мозговых оболочек, что обусловливает вероятность распространения по ним патологических оболочечных процессов (например, менингиом) [8, 18].

Анатомически зрительные нервы подразделяются на несколько сегментов (рис. 1):

• Интраокулярный (внутриглазной) сегмент: представлен волокнами ганглиозных клеток сетчатки, собирающимися в диске зрительного нерва, имеет протяженность около 1 мм.

• Интраорбитальный (ретробульбарный) сегмент: начинается от заднего полюса глазного яблока и простирается через орбиту к зрительному каналу, является наиболее протяженным сегментом (около 25 мм).

• Интраканаликулярный (внутрикальцевый) сегмент: проходит через зрительный канал, длиной около 9–10 мм.

• Интракраниальный (прехиазмальный) сегмент: выходит из зрительного канала и заканчивается в хиазме, протяженностью около 16 мм [1, 16, 19].

Зрительный перекрест (хиазма) представляет собой уплощенную структуру, высотой 2–3 мм, около 8–10 мм в переднезаднем направлении и 15 мм в поперечнике. Она также окружена продолжениями мозговых оболочек и располагается в супраселлярной цистерне [20].

Нервные волокна в хиазме совершают частичный перекрест: волокна от назальной (медиальной) части каждого зрительного нерва перекрещиваются и переходят на противоположную сторону, в то время как темпоральные (латеральные) волокна зрительных нервов не перекрещиваются, а остаются на ипсилатеральной стороне. От хиазмы волокна продолжаются в виде зрительных трактов, которые огибают ножки мозга и достигают подкорковых зрительных центров – латеральных коленчатых тел. Затем волокна следуют через заднее бедро внутренней капсулы в составе зрительной лучистости и заканчиваются в зрительной коре затылочных долей [10, 20, 21].

Технические условия и МРТ-протокол.

Для обеспечения качественной визуализации зрительных путей ключевую роль играет соблюдение необходимых условий для МРТ-исследования и параметров МРТ-протокола. Прежде всего, необходимо учесть величину магнитного поля томографа – рекомендуется использовать аппараты с величиной магнитной индукции не менее 1,5 Тл, однако для лучшей визуализации предпочтительнее томографы 3 Тл [1, 6, 22].

Также одним из важнейших аспектов для выявления патологических изменений в зрительных путях является корректное позиционирование срезов в разных плоскостях. Основными проекциями, используемыми при сканировании зрительных нервов, являются корональная и аксиальная плоскости. Следует подчеркнуть, что общепринятая разметка аксиальных срезов головного мозга, выполняющаяся по условной линии в сагиттальной плоскости, соединяющей нижние отделы колена и валика мозолистого тела, не подходит для оценки зрительных нервов – для этой цели необходимо позиционировать аксиальные срезы параллельно ходу зрительных нервов (рис. 2) [5, 23]. Несмотря на это, зрительные нервы не всегда полностью попадают в срез в аксиальной проекции за счет возможной их извитости, в связи с чем, корональная проекция является более предпочтительной, поскольку нервы захватываются в ней целиком. При наличии очаговых изменений отдельные авторы рекомендуют так же дополнительно использовать косокорональную проекцию строго перпендикулярно ходу зрительных нервов [24, 25]. Помимо выявления

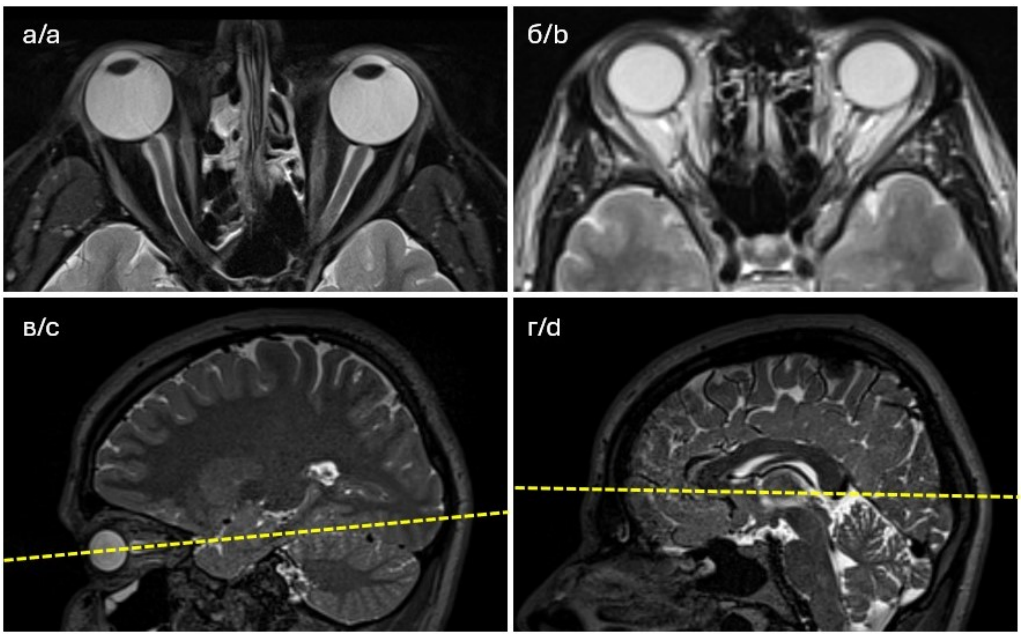

Рис. 2 (Fig. 2)

Рис. 2. МРТ.

Разметка аксиальных изображений зрительных нервов (а и б) по референтной линии в сагиттальной плоскости (показана желтым): в – разметка по ходу зрительных нервов; г – разметка по линии, соединяющей колено и валик мозолистого тела.

Fig. 2. MRI.

Planning of axial imaging of the optic nerves (a and b) based on the reference line in the sagittal plane (shown in yellow): c – planning along the course of the optic nerves; d – planning along the line connecting the genu and splenium of the corpus callosum.

очагов, не менее важным является измерение толщины зрительных нервов на предмет возможной их атрофии, для оценки которой предпочтительнее использовать режим Т2 с высоким разрешением в корональной плоскости, что обеспечивает максимальную дифференцировку между самим зрительным нервом и периневральным пространством (рис. 3). Сагиттальную плоскость параллельно ходу зрительных нервов некоторые авторы предлагают использовать дополнительно, но ее применение не является обязательным [5, 8].

Толщина срезов также является критическим фактором ввиду относительно небольшого диаметра зрительных нервов. Согласно рекомендациям экспертов, толщина срезов не должна превышать 3 мм, а между срезами не должно быть промежутка. Тем не менее, целесообразно использовать более тонкие срезы, чтобы полностью захватить зрительный нерв и избежать артефакта объемного усреднения, который может имитировать очаговые изменения [5, 6, 8].

Следует также обратить внимание на важность фиксации взора пациента во время исследования для исключения двигательных артефактов, о чем пациент должен быть проинформирован заранее. Кроме этого, пациенткам, приходящим на МРТ-исследование зрительных нервов, рекомендуется предварительно не наносить макияж, поскольку это может приводить к артефактам на получаемых изображениях.

Протокол МРТ-исследования зрительных нервов, с учетом существующих рекомендаций экспертных сообществ, должен включать следующие импульсные последовательности:

- 2D или 3D спин-эхо Т2-взвешенные изображения с жироподавлением в аксиальной и корональной плоскостях,
- 2D или 3D Т1-взвешенные изображения с жироподавлением в аксиальной и корональной плоскостях после внутривенного контрастирования [5].

При выборе 2D или 3D последовательностей в первую очередь важно учитывать цель исследования. 3D Т2-взвешенные изображения имеют меньшую толщину срезов,

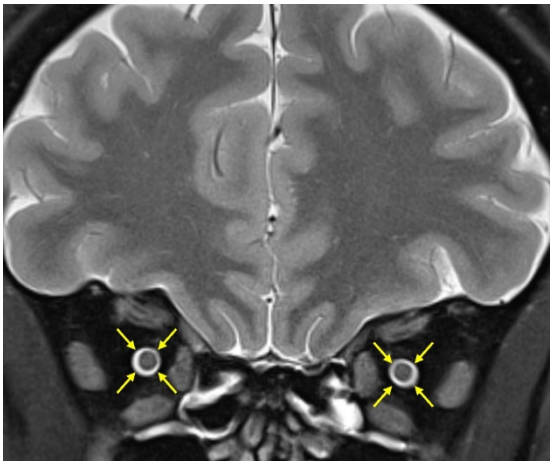

Рис. 3 (Fig. 3)

Рис. 3. МРТ, режим Т2 с высоким разрешением с жироподавлением, корональная плоскость.

Визуализация зрительных нервов и перинервального пространства (стрелки).

Fig. 3. MRI. T2-weighted imaging with fat saturation in the coronal plane.

Visualization of the optic nerves and perineural space (arrows) on high-resolution.

позволяют получить любую проекцию и поэтому считаются более предпочтительными [5, 8]. Однако соотношение сигнал-шум и качество на 3D изображениях может значительно уступать таковым на 2D изображениях, что может быть критичным при выявлении очаговых изменений в зрительных путях (рис. 4). В то же время, для получения Т1-взвешенных изображений, напротив, предпочтительнее использовать 3D последовательности, которые обеспечивают возможность оценки анатомии зрительных путей и выявление патологического контрастирования как интраневрально, так и перинервально в различных проекциях на всем их протяжении [23].

Для улучшения визуализации зрительных нервов рекомендуется применять импульсные последовательности (как Т2, так и Т1 режимы) с функцией жироподавления (рис. 2 а, 3), такие как STIR (short tau inversion-recovery) или FS (fat saturation) [23]. Ряд авторов рассматривает также использование методики Dixon вместо FS и STIR из-за более равномерного жироподавления и высокого соотношения сигнал-шум [10].

Для выбора импульсной последовательности при получении Т1-взвешенных изображений после внутривенного контрастирования необходимо учитывать ряд факторов, включая контрастность между зрительным нервом и окружающими структурами, а также потенциальные артефакты [26].

Режим 3D T1 MPRAGE (magnetization-prepared rapid acquisition gradient echo) является одной из наиболее широко используемых градиентных последовательностей для получения Т1-взвешенных изображений головного мозга. Он обеспечивает хорошую дифференцировку между серым и белым веществом, а также достаточно высокое пространственное разрешение и позволяет лучше выявлять периневральные изменения вокруг зрительных нервов. Однако 3D T1 MPRAGE может быть подвержен артефактам от тока крови в сосудах в области самих зрительных нервов и хиазмы, что затрудняет их оценку [23].

Режим 3D T1 space black blood (BB) специально разработан для подавления МР-сигнала от крови в сосудах и улучшения визуализации небольших анатомических структур, таких как зрительные нервы. Он основан на спин-эхо (SE) последовательности и обеспечивает высокий контраст между зрительным нервом и окружающей жировой клетчаткой (имеющей низкий МР-сигнал за счет жироподавления), что облегчает оценку зрительных нервов и улучшает визуализацию интраневральных изменений. Возможным недостатком данного режима может стать более низкое пространственное разрешение по сравнению с режимом 3D T1 MPRAGE [23, 27].

Режим 3D T1 VIBE (Volumetric Interpolated Breath-hold Examination) представляет собой трехмерную градиентную последовательность с коротким временем сканирования и высоким пространственным разрешением. 3D T1 VIBE также может обеспечить хороший контраст между нервной тканью и окружающими структурами, но при этом он более подвержен артефактам от тока крови, чем режим 3D T1 BB и обладает слабой чувствительностью в выявлении интраневральных очагов и периневрального контрастирования [8, 27].

Для оптимальной визуализации зрительных нервов и интраневральных изменений предпочтительнее использовать режим 3D T1 BB [23]. В то же время, для оценки периневральных изменений, общей оценки анатомии головного мозга и визуализации других отделов зрительного пути, лучше использовать режим 3D T1 MPRAGE. В свою очередь, режим 3D T1 VIBE позволяет оценить общую анатомию зрительных нервов, однако, в отличие от режима 3D T1 MPRAGE,

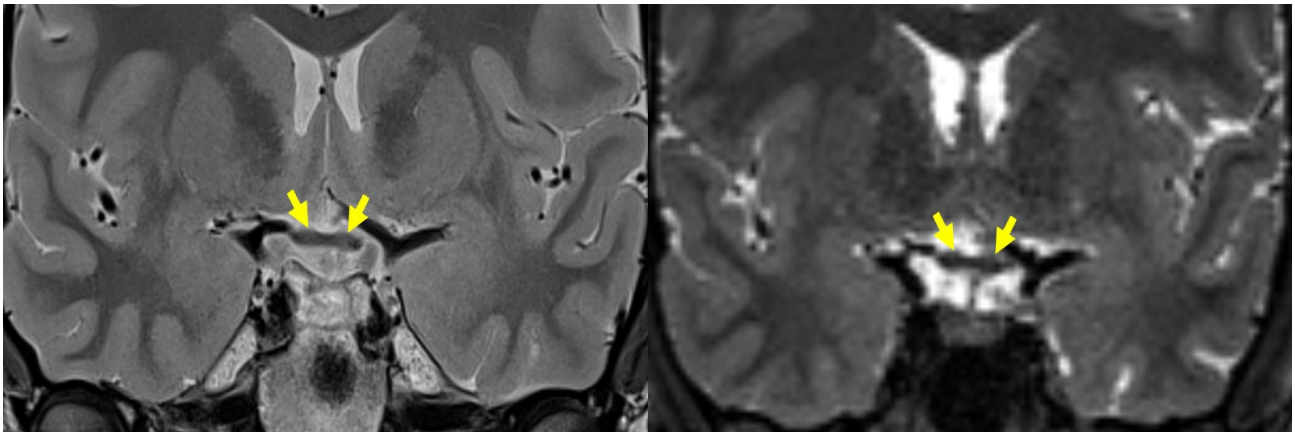

Рис. 4 (Fig. 4)

Рис. 4. МРТ. Различия в качестве 2D (слева) и 3D (справа) Т2-взвешенных изображений на примере визуализации хиазмы (желтые стрелки) (Siemens Magnetom Prisma, 3 Тл).

Изображение слева (2D) демонстрирует хорошую дифференцировку серого и белого вещества и более отчетливую визуализацию хиазмы; изображение справа (3D) показывает более низкое соотношение сигнал-шум в области хиазмы, что ухудшает качество изображения.

Fig. 4. MRI. Differences in quality between 2D (left) and 3D (right) T2-weighted images in the visualization of the optic chiasm (yellow arrows) (Siemens Magnetom Prisma, 3 Tesla).

The 2D image (left) demonstrates good differentiation of gray and white matter and clearer visualization of the chiasm; the 3D image (right) shows lower signal-to-noise ratio in the chiasm region, leading to poorer image quality.

отчетливая дифференцировка зрительного нерва от периневрального пространства, а также серого и белого вещества головного мозга в нем затруднена. Таким образом, использование комбинации последовательностей 3D T1 BB и 3D T1 MPRAGE представляется наиболее оптимальным для постконтрастной МРТ-визуализации зрительной системы (рис. 5).

Помимо стандартных Т2-взвешенных импульсных последовательностей в оценке очаговых изменений зрительных нервов и хиазмы могут быть полезны специальные 3D режимы с высокой контрастностью между серым и белым веществом, тонкими срезами (около 1 мм) и изотропным вокселем для последующей реконструкции в необходимых плоскостях. К таким режимам относится последовательность 3D T1 MP2RAGE (magnetization-prepared 2 rapid acquisition gradient echo) (рис. 6) [28, 29]. Несмотря на то, что на Т1-взвешенных изображениях очаги демиелинизации имеют гипоинтенсивный МР-сигнал, что затрудняет их визуализацию на фоне гипоинтенсивного ликвора, контрастность режима 3D T1 MP2RAGE позволяет четко дифференцировать очаги в зрительных путях, а небольшая толщина срезов позволяет избежать артефакта объемного усреднения [30].

Стоит отметить, что нарушение зрения может быть обусловлено не только поражением зрительных нервов, но и других отделов головного мозга, в связи с чем целесообразно включение в МРТ-протокол зрительных нервов последовательности 2D или 3D T2 FLAIR, позволяющей оценить изменения в веществе головного мозга [19, 31].

Таким образом, для визуализации зрительных нервов и других отделов зрительной системы головного мозга рекомендуется соблюдать следующие технические условия для МРТ-исследования и параметры МРТ-протокола (табл. №1).

Заключение.

МРТ является незаменимым инструментом в оценке анатомии зрительных путей, а также в диагностике и мониторинге патологий зрительной системы головного мозга. Учет анатомических особенностей зрительной системы, а также соблюдение технических условий проведения МРТ-исследования и использование современных сверхвысокопольных МРТ-систем способствуют повышению точности диагностики патологий зрительных нервов. Дальнейшее развитие МРТ-технологий, усовершенствование МРТ-протоколов зрительных нервов и

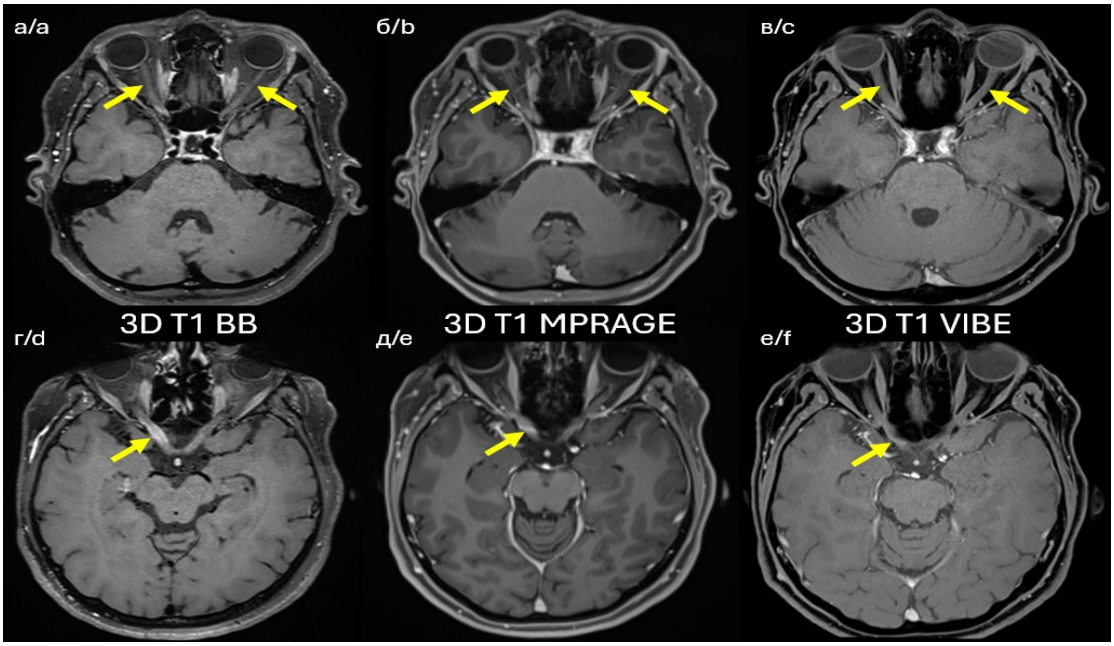

Рис. 5 (Fig. 5)

Рис. 5. МРТ головного мозга и зрительных нервов после внутривенного контрастирования, а, г – режим 3D T1 BB, б, д – режим 3D T1 MPRAGE, в, е – режим 3D T1 VIBE.

Верхний ряд: зрительные нервы (стрелки) отчетливо визуализируются в режимах 3D T1 BB (а) и 3D T1 VIBE (в), в то время как перивенральное пространство дифференцируется только в режиме 3D T1 MPRAGE (б). Нижний ряд: очаг демиелинизации в правом зрительном нерве (стрелки) отчетливее определяется в режиме 3D T1 BB (г), хуже – в режиме 3D T1 MPRAGE (д), практически не визуализируется – в 3D T1 VIBE (е).

Fig. 5. MRI of the brain and optic nerves after intravenous contrast administration, a, d – 3D T1 BB, b, e – 3D T1 MPRAGE, c, f – 3D T1 VIBE.

Upper row: the optic nerves (arrows) are clearly visualized in the 3D T1 BB (a) and 3D T1 VIBE (c) sequences, while the perineural space is only differentiated in the 3D T1 MPRAGE (b) sequence. Lower row: the demyelinating lesion in the right optic nerve (arrows) is most distinctly defined in the 3D T1 BB (d), less clearly in the 3D T1 MPRAGE (e), and is nearly unvisualized in the 3D T1 VIBE (f).

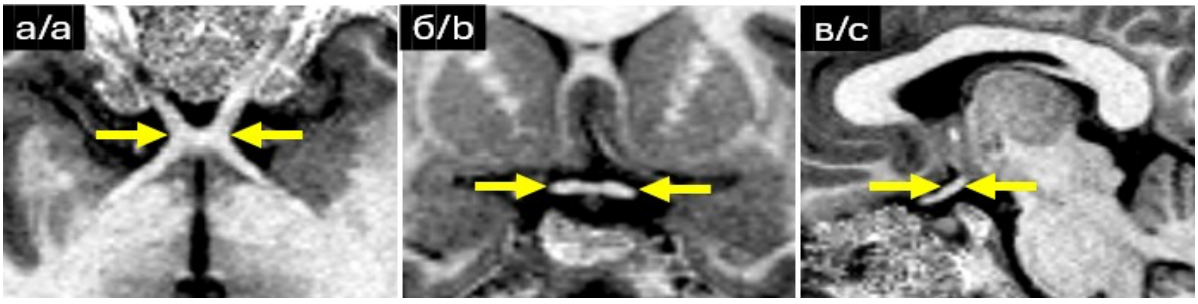

Рис. 6 (Fig. 6)

Рис. 6. МРТ интракраниальных отделов зрительных путей (стрелки) в норме, режим 3D T1 MP2RAGE, а – аксиальная плоскость, б – корональная плоскость, в – сагиттальная плоскость.

Fig. 6. MRI of the intracranial portions of the optic pathways (arrows) in the 3D T1 MP2RAGE sequence, a – axial plane, b – coronal plane, c – sagittal plane, demonstrating the absence of pathology.

Таблица №1. Технические условия для МРТ-исследования и параметры МРТ-протокола зрительных нервов.

Величина магнитной индукции томографа	≥1,5 Тл
Толщина срезов	≤ 2 мм без межсрезового промежутка
Проекция	Корональная (предпочтительнее) Аксиальная – строго по ходу зрительных нервов
Режимы до внутривенного контрастирования	2D T2 с жироподавлением – оценка очагов и толщины зрительных нервов
Режимы после внутривенного контрастирования	3D T1 BB с жироподавлением – интраневральное контрастирование 3D T1 MPRAGE с жироподавлением – перинервальное контрастирование
Дополнительные режимы	2D или 3D T2 FLAIR 3D T1 MP2RAGE
Дополнительные условия	Фиксация взора во время МРТ-исследования Отсутствие макияжа глаз

внедрение их в клиническую практику позволят улучшить выявляемость заболеваний, проявляющихся нарушением зрения.

Источник финансирования и конфликт интересов.

Авторы данной статьи подтвердили отсутствие финансовой поддержки исследования и конфликта интересов, о которых необходимо сообщить.

Список литературы:

1. Gala F. Magnetic resonance imaging of optic nerve. Indian J Radiol Imaging. 2015;25(4):421-38. doi:10.4103/0971-3026

2. Kanda T, Miyazaki A, Zeng F, Ueno Y, Sofue K, Maeda T, et al. Magnetic resonance imaging of intraocular optic nerve disorders: review article. Pol J Radiol. 2020;85. doi:10.5114/pjr.2020.93364

3. Исраелян Ш.О., Серова Н.С., Павлова О.Ю., Бабкова А.А., Путило Д.В., Щекотуров И.О. Лучевая диагностика новообразований структур орбиты. REJR. 2022; 12(3): 18-28. doi: 10.21569/2222-7415-2022-12-3-18-28

4. Biousse V, Danesh-Meyer HV, Saindane AM, Lamirel C, Newman NJ. Imaging of the optic nerve: technological advances and future prospects. Lancet Neurol. 2022;21(12):1135-1150. doi:10.1016/S1474-4422(22)00173-9

5. Wattjes MP, Ciccarelli O, Reich DS, Banwell B, de Stefano N, Enzinger C, et al. 2021 MAGNIMS-CMSC-NAIMS consensus recommendations on the use of MRI in patients with multiple sclerosis. Lancet Neurol. 2021;20(8):653-670. doi:10.1016/S1474-4422(21)00095-8

6. Petzold A, Wattjes MP, Costello F, Flores-Rivera J, Fraser CL, Fujihara K, et al. The investigation of acute optic neuritis: a review and proposed protocol. Nat Rev Neurol. 2014;10(8):447-58. doi:10.1038/nrneurol.2014.108

7.Schroeder A, Van Stavern G, Orlowski HLP, Stunkel L, Parsons MS, Rhea L, et al. Detection of optic neuritis on routine brain MRI without and with the assistance of an image post-processing algorithm. AJNR Am J Neuroradiol. 2021;42(6):1130-1135. doi:10.3174/ajnr.A7068

8. Hoch MJ, Bruno MT, Shepherd TM. Advanced MRI of the optic nerve. J Neuroophthalmol. 2017;37(2):187-196. doi:10.1097/WNO.0000000000000511

9. Sims JR, Chen AM, Sun Z, Deng W, Colwell NA, Colbert MK, et al. Role of structural, metabolic, and functional MRI in monitoring visual system impairment and recovery. J Magn Reson Imaging. 2021;54(6):1706-1729. doi:10.1002/jmri.27367

10. Patel SC, Smith SM, Kessler AT, Bhatt AA. Imaging of the primary visual pathway based on visual deficits. J Clin Imaging Sci. 2021;11:19. doi:10.25259/JCIS_12_2021

11. Jarius S, Aktas O, Ayzenberg I, Bellmann-Strobl J,

Berthele A, Giglhuber K, et al. Update on the diagnosis and treatment of neuromyelitis optica spectrum disorders (NMOSD) – revised recommendations of the Neuromyelitis Optica Study Group (NEMOS). Part I: Diagnosis and differential diagnosis. J Neurol. 2023;270(7):3341-3368. doi:10.1007/s00415-023-11634-0

12. Шеремет Н.Л., Елисеева Д.Д., Брюхов В.В., Калашникова А.К., Калошина А.А., Мураховская Ю.К. и др. Оптические нейропатии как предмет междисциплинарного изучения. Вестник офтальмологии. 2023;139(3-2):63-70. doi:10.17116/oftalma202313903263.

13. Шеремет Н.Л., Елисеева Д.Д., Брюхов В.В., Андреева Н.А., Жоржоладзе Н.В., Мураховская Ю.К. и др. Особенности клинического течения атипичных демиелинизирующих оптических невритов: серия клинических наблюдений. Неврология, нейропсихиатрия, психосоматика. 2023;15 (Прил. 1):35-42. doi: 10.14412/2074-2711-2023-1S-35-42.

14. Елисеева Д.Д., Калашникова А.К., Брюхов В.В., Андреева Н.А., Жоржоладзе Н.В., Мураховская Ю.К. и др. Наследственная оптическая нейропатия в сочетании с демиелинизирующими заболеваниями центральной нервной системы. Журнал неврологии и психиатрии им. С.С. Корсакова. 2023, т. 123, №7, вып. 2, с. 122-132 doi:10.17116/jnevro2023123072122.

15. Matthews L, Enzinger C, Fazekas F, Rovira A, Ciccarelli O, Dotti MT, et al. MRI in Leber's hereditary optic neuropathy: the relationship to multiple sclerosis. J Neurol Neurosurg Psychiatry. 2015;86(6):537-542. doi:10.1136/jnnp-2014-308186

16. Romano N, Federici M, Castaldi A. Imaging of cranial nerves: a pictorial overview. Insights Imaging. 2019;10:33. doi:10.1186/s13244-019-0719-5

17. Nave KA, Werner HB. Myelination of the nervous system: mechanisms and functions. Annu Rev Cell Dev Biol. 2014;30:503-533. doi:10.1146/annurev-cellbio-100913-013101

18. Freddi TAL, Ottaiano AC. The optic nerve: anatomy and pathology. Semin Ultrasound CT MR. 2022;43(5):378-388. doi:10.1053/j.sult.2022.04.006

19.Becker M, Masterson K, Delavelle J, Delavelle J, Viallon M, Vargas MI, et al. Imaging of the optic nerve. Eur J Radiol. 2010;74(2):299-313. doi:10.1016/j.ejrad.2009.09.029

20. Бер М, Фротшер М. Топический диагноз в неврологии по Петеру Дуусу: анатомия, физиология, клиника. Пер. с англ. под ред. О.С. Левина. Практическая медицина. 2018.

21. Walsh C. Optic nerves, optic chiasm, and optic tracts. In: Sensory System I. Birkhäuser, Boston, MA; 1988:6647-6649. doi:10.1007/978-1-4899-6647-6_21

22. Mafee MF, Rapoport M, Karimi A, Ansari SA, Shah J. Orbital and ocular imaging using 3- and 1.5-T MR imaging systems. Neuroimaging Clin N Am. 2005;15(1):1-21. doi:10.1016/j.nic.2005.02.010

23. Chow LS, Paley MNJ. Recent advances on optic nerve magnetic resonance imaging and post-processing. Magn Reson Imaging. 2021;79:76-84. doi:10.1016/j.mri.2021.03.014Wu KC, Guenette JP, Huang RY, et al. Improved optic nerve visualization and treatment planning through a dedicated optic nerve MRI protocol. Neurosurg Focus. 2024;56(4). doi:10.3171/2024

24. Wu KC, Guenette JP, Huang RY, Al-Mefty O, Dunn IF, Bi WL. Improved optic nerve visualization and treatment planning through a dedicated optic nerve MRI protocol. Neurosurg Focus. 2024;56(4). doi:10.3171/2024

25.Yiannakas MC, Toosy AT, Raftopoulos RE, Kapoor R, Miller DH, Wheeler-Kingshott CA. MRI Acquisition and Analysis Protocol for In Vivo Intraorbital Optic Nerve Segmentation at 3T. Invest Ophthalmol Vis Sci. 2013;54(6):4235-4240. doi:10.1167/iovs.13-12357

26. Bapst B, Amegnizin JL, Vignaud A, Kauv P, Maraval A, Kalsoum E, et al. Post-contrast 3D T1-weighted TSE MR sequences (SPACE, CUBE, VISTA/BRAINVIEW, isoFSE, 3D MVOX): Technical aspects and clinical applications. J Neuroradiol. 2020;47(5):358-368. doi:10.1016/j.neurad.2020.01.085

27. Riederer I, Sollmann N, Mühlau M, Zimmer C, Kirschke JS. Gadolinium-Enhanced 3D T1-Weighted Black-Blood MR Imaging for the Detection of Acute Optic Neuritis. AJNR Am J Neuroradiol. 2020;41(12):2333-2338. doi:10.3174/ajnr.A6807

28. Tanner M, Gambarota G, Kober T, Krueger G, Erritzoe D, Marques JP, et al. Fluid and white matter suppression with the MP2RAGE sequence. J Magn Reson Imaging. 2012;35(5):1063-1070. doi:10.1002/jmri.23532

29. Marques JP, Gruetter R. New Developments and Applications of the MP2RAGE Sequence - Focusing the Contrast and High Spatial Resolution R1 Mapping. PLoS One. 2013;8(7). doi:10.1371/journal.pone.0069294

30. Матросова М.С., Брюхов В.В., Бельская Г.Н., Кротенкова М.В. Применение режима T1 MP2RAGE для МРТ-оценки очаговых изменений в головном и спинном мозге при рассеянном склерозе. REJR. 2023; 13(1): 87-95. doi:10.21569/2222-7415-2023-13-1-87-95.

31. Aiken AH, Mukherjee P, Green AJ, Glastonbury CM. MR imaging of optic neuropathy with extended echo-train acquisition fluid-attenuated inversion recovery. AJNR Am J Neuroradiol. 2011;32(2):301-305. doi:10.3174/ajnr.A2391.

References:

1. Gala F. Magnetic resonance imaging of optic nerve. Indian J Radiol Imaging. 2015;25(4):421-38. doi:10.4103/0971-3026

2. Kanda T, Miyazaki A, Zeng F, Ueno Y, Sofue K, Maeda T, et al. Magnetic resonance imaging of intraocular optic nerve disorders: review article. Pol J Radiol. 2020;85. doi:10.5114/pjr.2020.93364

3. Israelyan Sh.O., Serova N.S., Pavlova O.Yu., Babkova A.A., Putilo D.V., Shchekoturov I.O. Radiology of orbital structures' tumors. REJR 2022; 12(3): 18-28. doi: 10.21569/2222-7415-2022-12-3-18-28 (in Russian).

4.Biousse V, Danesh-Meyer HV, Saindane AM, Lamirel C, Newman NJ. Imaging of the optic nerve: technological advances and future prospects. Lancet Neurol. 2022;21(12):1135-1150. doi:10.1016/S1474-4422(22)00173-9

5. Wattjes MP, Ciccarelli O, Reich DS, Banwell B, de Stefano N, Enzinger C, et al. 2021 MAGNIMS-CMSC-NAIMS consensus

recommendations on the use of MRI in patients with multiple sclerosis. Lancet Neurol. 2021;20(8):653-670. doi:10.1016/S1474-4422(21)00095-8

6. Petzold A, Wattjes MP, Costello F, Flores-Rivera J, Fraser CL, Fujihara K, et al. The investigation of acute optic neuritis: a review and proposed protocol. Nat Rev Neurol. 2014;10(8):447-58. doi:10.1038/nrneurol.2014.108

7. Schroeder A, Van Stavern G, Orlowski HLP, Stunkel L, Parsons MS, Rhea L, et al. Detection of optic neuritis on routine brain MRI without and with the assistance of an image postprocessing algorithm. AJNR Am J Neuroradiol. 2021;42(6):1130-1135. doi:10.3174/ajnr.A7068

8. Hoch MJ, Bruno MT, Shepherd TM. Advanced MRI of the optic nerve. J Neuroophthalmol. 2017;37(2):187-196. doi:10.1097/WNO.0000000000000511

9. Sims JR, Chen AM, Sun Z, Deng W, Colwell NA, Colbert MK, et al. Role of structural, metabolic, and functional MRI in monitoring visual system impairment and recovery. J Magn Reson Imaging. 2021;54(6):1706-1729. doi:10.1002/jmri.27367

10. Patel SC, Smith SM, Kessler AT, Bhatt AA. Imaging of the primary visual pathway based on visual deficits. J Clin Imaging Sci. 2021;11:19. doi:10.25259/JCIS_12_2021

11. Jarius S, Aktas O, Ayzenberg I, Bellmann-Strobl J, Berthele A, Giglhuber K, et al. Update on the diagnosis and treatment of neuromyelitis optica spectrum disorders (NMOSD) – revised recommendations of the Neuromyelitis Optica Study Group (NEMOS). Part I: Diagnosis and differential diagnosis. J Neurol. 2023;270(7):3341-3368. doi:10.1007/s00415-023-11634-0

12. Sheremet NL, Eliseeva DD, Bryukhov VV, Kalashnikova AK, Kaloshina AA, Murakhovskaya YuK, et al. Optic neuropathies as an interdisciplinary subject of research. Russian Annals of Ophthalmology. 2023;139(3-2):63-70 (in Russian).

13. Sheremet NL, Eliseeva DD, Bryukhov VV, Andreeva NA, Zhorzholadze NV, Murakhovskaya YK, et al. Clinical course features of atypical demyelinating optic neuritis: case series. Neurology, Neuropsychiatry, Psychosomatics. 2023;15:35-42 (in Russian).

14. Eliseeva DD, Kalashnikova AK, Bryukhov VV, Andreeva NA, Zhorzholadze NV, Murakhovskaya YK, et al. Hereditary optic neuropathy associated with demyelinating diseases of the central nervous system. S.S. Korsakov Journal of Neurology and Psychiatry. 2023;123(7-2):122-132 (in Russian).

15. Matthews L, Enzinger C, Fazekas F, Rovira A, Ciccarelli O, Dotti MT, et al. MRI in Leber's hereditary optic neuropathy: the relationship to multiple sclerosis. J Neurol Neurosurg Psychiatry. 2015;86(6):537-542. doi:10.1136/jnnp-2014-308186

16. Romano N, Federici M, Castaldi A. Imaging of cranial nerves: a pictorial overview. Insights Imaging. 2019;10:33. doi:10.1186/s13244-019-0719-5

17. Nave KA, Werner HB. Myelination of the nervous system: mechanisms and functions. Annu Rev Cell Dev Biol. 2014;30:503-533. doi:10.1146/annurev-cellbio-100913-013101

18. Freddi TAL, Ottaiano AC. The optic nerve: anatomy and pathology. Semin Ultrasound CT MR. 2022;43(5):378-388. doi:10.1053/j.sult.2022.04.006

19. Becker M, Masterson K, Delavelle J, Delavelle J, Viallon M, Vargas MI, et al. Imaging of the optic nerve. Eur J Radiol. 2010;74(2):299-313. doi:10.1016/j.ejrad.2009.09.029

20. Ber M, Frotscher M. Topical diagnosis in neurology according to Peter Duus: anatomy, physiology, clinical findings. Translated from English, edited by Levin OS. Moscow: Practical Medicine; 2018.

21. Walsh C. Optic nerves, optic chiasm, and optic tracts. In: Sensory System I. Birkhäuser, Boston, MA; 1988:6647-6649. doi:10.1007/978-1-4899-6647-6_21

22. Mafee MF, Rapoport M, Karimi A, Ansari SA, Shah J. Orbital and ocular imaging using 3- and 1.5-T MR imaging systems. Neuroimaging Clin N Am. 2005;15(1):1-21. doi:10.1016/j.nic.2005.02.010

23. Chow LS, Paley MNJ. Recent advances on optic nerve magnetic resonance imaging and post-processing. Magn Reson Imaging. 2021;79:76-84. doi:10.1016/j.mri.2021.03.014Wu KC, Guenette JP, Huang RY, et al. Improved optic nerve visualization and treatment planning through a dedicated optic nerve MRI protocol. Neurosurg Focus. 2024;56(4). doi:10.3171/2024

24. Wu KC, Guenette JP, Huang RY, Al-Mefty O, Dunn IF, Bi WL. Improved optic nerve visualization and treatment planning through a dedicated optic nerve MRI protocol. Neurosurg Focus. 2024;56(4). doi:10.3171/2024

25. Yiannakas MC, Toosy AT, Raftopoulos RE, Kapoor R, Miller DH, Wheeler-Kingshott CA. MRI Acquisition and Analysis Protocol for In Vivo Intraorbital Optic Nerve Segmentation at 3T. Invest Ophthalmol Vis Sci. 2013;54(6):4235-4240. doi:10.1167/iovs.13-12357

26. Bapst B, Amegnizin JL, Vignaud A, Kauv P, Maraval A, Kalsoum E, et al. Post-contrast 3D T1-weighted TSE MR sequences (SPACE, CUBE, VISTA/BRAINVIEW, isoFSE, 3D MVOX): Technical aspects and clinical applications. J Neuroradiol. 2020;47(5):358-368. doi:10.1016/j.neurad.2020.01.085

27. Riederer I, Sollmann N, Mühlau M, Zimmer C, Kirschke JS. Gadolinium-Enhanced 3D T1-Weighted Black-Blood MR Imaging for the Detection of Acute Optic Neuritis. AJNR Am J Neuroradiol. 2020;41(12):2333-2338. doi:10.3174/ajnr.A6807

28. Tanner M, Gambarota G, Kober T, Krueger G, Erritzoe D, Marques JP, et al. Fluid and white matter suppression with the MP2RAGE sequence. J Magn Reson Imaging. 2012;35(5):1063-1070. doi:10.1002/jmri.23532

29. Marques JP, Gruetter R. New Developments and Applications of the MP2RAGE Sequence - Focusing the Contrast and High Spatial Resolution R1 Mapping. PLoS One. 2013;8(7). doi:10.1371/journal.pone.0069294

30. Matrosova MS, Bryukhov VV, Belskaya GN, Krotenkova MV. T1 MP2RAGE for brain and cervical spine lesions assessment in multiple sclerosis. REJR. 2023;13(1):87-95 (in Russian).

31. Aiken AH, Mukherjee P, Green AJ, Glastonbury CM. MR imaging of optic neuropathy with extended echo-train acquisition fluid-attenuated inversion recovery. AJNR Am J Neuroradiol. 2011;32(2):301-305. doi:10.3174/ajnr.A2391.