

О. Б. Богомякова¹, А. А. Тулупов^{1,2}, Л. А. Савельева¹, Ю. А. Прыгова²

¹ Институт «Международный томографический центр» СО РАН
ул. Институтская, 3 А, Новосибирск, 630090, Россия

² Новосибирский государственный университет
ул. Пирогова, 2, Новосибирск, 630090, Россия

E-mail: o_ezhova@ngs.ru

ВОЗМОЖНОСТИ МАГНИТНО-РЕЗОНАНСНОЙ ТОМОГРАФИИ В КОЛИЧЕСТВЕННОЙ ОЦЕНКЕ ЛИКВОРОДИНАМИКИ*

В связи с широкой распространенностью в Российской Федерации заболеваний центральной нервной системы, в основе патогенеза которых лежит нарушение циркуляции цереброспинальной жидкости, большой интерес представляет разработка новых диагностических подходов к исследованию ликворосодержащих структур. В настоящее время существует ряд методов лучевой диагностики, позволяющих визуализировать и проводить диагностическую оценку ликворных пространств головного и спинного мозга: пневмомиеелография, контрастная миелография, изотопная миелография, пневмоэнцефалография, вентрикулография с неионными рентгеноконтрастными веществами и др.

Однако эти методы инвазивны, сопряжены с высокой лучевой нагрузкой, риском неврологических и инфекционных осложнений и практически не используются в повседневной диагностической практике. Развитие рентгеновской компьютерной томографии (КТ) и ее приложения – КТ-миелографии – открыло специалистам новый малоинвазивный и высокоинформативный подход к оценке ликворосодержащих структур. Однако КТ-миелография остается

рентгеновским методом с обязательным применением контрастного вещества. Ультразвуковое исследование не нашло широкого применения в силу физических особенностей метода: возможно только у детей через роднички. Именно поэтому в последнее десятилетие широкое распространение получил метод магнитно-резонансной томографии (МРТ) и такое приложение, как МР-миелография в статическом режиме. Эта методика позволяет визуализировать ликворные пространства и полости центральной нервной системы без контрастного усиления и лучевой нагрузки.

Перечисленные методы помогают оценить морфологические характеристики ликворосодержащих пространств и топографические взаимоотношения между ними и окружающими их тканями. Однако все указанные методики позволяют проводить оценку изменений, происходящих в ликворных пространствах, лишь за достаточно большие промежутки времени, не учитывая динамическую составляющую ликвородинамики.

Несомненным преимуществом МРТ является то, что изображение тканей можно получить в различных плоскостях, манипу-

* Работа выполнена при финансовой поддержке грантов Президента РФ в рамках государственной поддержки ведущих научных школ (НШ-7643.2010.3), ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг. (ГК № 16.740.11.0342 от 05.10.2010 и № 16.740.11.0605 от 31.05.2011), программы «У.М.Н.И.К.» (договор НИОКР № 16У/02-10 от 26.04.2010).

лируя ориентацией градиентов магнитного поля. Кроме того, МРТ дает более четкую и детализированную картину (отсутствует «эффект слияния» структур и тканей близких по плотности), позволяя точно оценивать степень и распространенность патологических изменений. Чувствительность и специфичность МРТ в отношении центральной нервной системы превосходит такие современные методы диагностики, как КТ и УЗИ [1; 2].

Широкие возможности метода МРТ подтверждены рядом зарубежных и отечественных исследований [3–6]. Например, исследование В. А. Хачатряна и соавт. [3] посвящено сравнению информативности КТ и МРТ. Проведено исследование головного мозга у 369 детей с врожденной гидроцефалией, которое выявило у части из пациентов расширение ликворосодержащих систем значительной и умеренной степени выраженности. Как правило, данные КТ и МРТ совпадали, однако томография была более информативна при ствольных новообразованиях, а также позволяла более точно характеризовать патологический процесс и уточнить степень проходимости ликворосодержащих структур. Также в 6 наблюдениях на МРТ выявлены опухоли ствольных структур головного мозга при отсутствии таких данных КТ. Таким образом, МРТ-исследование оказалось более информативным при определении природы патологического процесса и уточнении первопричины расстройств ликвороциркуляции. L. A. Saint-Louis и соавт. [5] провели сравнение КТ, КТ-миелографии и МРТ, как методов визуализации различной патологии спинного мозга. Авторы показали, что эти диагностические методы дополняют друг друга. Однако было предложено использовать метод МРТ первым, поскольку он является неинвазивным.

Вместе с этим чрезвычайно важными направлениями научно-диагностической деятельности являются развитие и оптимизация уже существующих МРТ-подходов к исследованию цереброспинальной жидкости таким образом, чтобы максимально повысить информативность метода, сократить продолжительность обследования пациента и получить максимум количественной и качественной информации с целью последующего детального изучения морфофункциональных особенностей ликворной системы.

Особую актуальность представляет развитие не только методик, позволяющих оценивать эту систему с точки зрения ее структурной организации, но и активное применение научно-диагностических подходов с возможностью оценки количественных параметров потока ликвора. Именно поэтому наиболее актуальным направлением является развитие и широкое внедрение в диагностическую практику методики МР-миелографии в режиме количественной оценки потока на основе фазо-контрастной МРТ с кардиосинхронизацией по электрокардиографии (ЭКГ).

Методика фазового контраста использует сдвиг фазы прецессии спинов, который возникает, когда спины перемещаются в присутствии градиента поля. Фазовые изображения одного и того же среза получают дважды: первый раз с компенсацией движения (биполярный градиент), а второй раз – без нее. Затем одно изображение вычитается из другого, в результате остаются МР-сигналы только от движущейся жидкости, так как сигнал от неподвижной ткани на каждом изображении одинаков и исключается полностью. Методика фазового контраста позволяет визуализировать течение жидкости в плоскости среза, картировать скорость движения жидкости и измерять скорость потока. Яркий или темный сигнал поток приобретает за счет фазовых эффектов, возникающих при движении протонов [7; 8]. При использовании синхронизации импульсной последовательности с электрокардиограммой методика применима для визуализации быстрого артериального кровотока (около 80 см/с), медленного венозного кровотока и медленного движения ликвора (около 10–20 см/с) [9]. Метод фазового контраста чаще используется для визуализации и количественной оценки относительно быстродвижущегося потока крови, однако, особым образом модифицируя параметры импульсной последовательности, можно получить МР-изображения ликвотока в различных отделах головного и спинного мозга. При этом формируется три типа изображений: FFE/M – «нативные» изображения, полученные в режиме FFE (быстрое полевое эхо); PCA/M – изображения, полученные методом фазового контраста, которые в последующем могут обрабатываться для избирательной визуализации потока в различных плоскостях; PCA/P –

изображения с фазовыми различиями скоростей, причем яркость сигнала на данных изображениях соответствует непосредственно скорости движения спинов.

Просмотр изображений, полученных в последовательные фазы сердечного цикла, в кинорежиме дает возможность визуализировать пульсовое движение ликвора, а также вычислить средний поток за кардиоцикл и мгновенные значения скорости потока в отдельные его фазы [10]. Таким образом, фазоконтрастная МРТ позволяет визуально оценивать движение ликвора, а также проводить количественную оценку параметров ликвородинамики.

Нормальная анатомия и физиология ликвороциркуляции

Спинной и головной мозг окружены мозговыми оболочками трех видов: твердая, паутинная и мягкая. Дубликатуры твердой мозговой оболочки образуют полые синусы, по которым от головного мозга оттекает венозная кровь. Между паутинной и твердой оболочками имеется щелевидной формы субдуральное пространство, заполненное небольшим количеством спинномозговой жидкости, а от мягкой оболочки паутинная отделена посредством субарахноидального пространства, заполненного ликвором, с многочисленными волокнами и перекладинами. Паутинная оболочка облегает спинной и головной мозг со всех сторон и на выдающихся частях головного мозга срастается с мягкой мозговой оболочкой, не следуя, однако, за последней в глубину борозд и щелей. В местах, где сращения отсутствуют, остаются пространства, называемые подпаутинными полостями. В базальных отделах головного мозга эти пространства довольно значительны и носят название подпаутинных цистерн.

Биологические свойства ликвора большей частью связаны с его составом. По своей природе спинномозговая жидкость – это фильтрат плазмы крови, который образуется в сосудистых сплетениях за счет разницы давлений по разные стороны капиллярной стенки. В нормальном ликворе форменные элементы находятся в незначительном количестве и почти целиком состоят из ядерных лимфоцитов, мононуклеаров.

Спинномозговая жидкость, заполняющая подпаутинное пространство, продуцируется

сосудистыми сплетениями желудочков мозга. Из боковых желудочков через правое и левое межжелудочковые отверстия Монро ликвор поступает в третий желудочек, где также имеется сосудистое сплетение. Из третьего желудочка через Сильвиев водопровод спинномозговая жидкость попадает в четвертый желудочек, а из него через непарное срединное отверстие Мажанди и латеральные апертуры Лушка в мозжечково-мозговую цистерну и далее в субарахноидальное пространство спинного мозга. Таким образом, субарахноидальные пространства головного и спинного мозга с их цистернами имеют непосредственное сообщение с желудочками мозга, образуя вместе с ними как бы ряд сообщающихся сосудов.

Общепризнанной является точка зрения, согласно которой ликвор из подпаутинного пространства путем фильтрации и диффузии через пахионовы грануляции проникает в венозную систему мозга. Кроме того, в межклеточных, глиальных и околососудистых пространствах мозга циркулирует межклеточная жидкость. Источником этой жидкости может быть глиальная ткань, которая, взаимодействуя с кровью, обеспечивает поступление в мозг жидкости.

Пути, по которым межклеточная жидкость транспортируется из вещества мозга, рассматриваются как прелимфатические пути ЦНС. К ним относят несосудистые пути циркуляции жидкости в веществе мозга (перипеллюлярные, периваскулярные и периневральные пространства), ликворные полости, тканевые щели твердой мозговой оболочки.

Ко второму, сосудистому звену лимфатического региона ЦНС, относятся лимфатические капилляры и сосуды, афферентные по отношению к лимфоузлам головы, шеи и паравертебральной области. Далее жидкость поступает в лимфатические узлы – третье звено лимфатического региона. Кроме того, из интерстициального пространства часть жидкости напрямую поступает в венозные капилляры [11].

Более поздние исследования еще раз подтвердили, что концепцию сплошного потока ликвора к пахионовым грануляциям следует пересмотреть, поскольку ликвор адсорбируется не только посредством этих структур, но и другими различными путями в кровеносную и лимфатическую систему организма.

Система ликвороциркуляции имеет ряд физиологических характеристик. К ним относятся следующие параметры [12].

1. Статические:

- объем ликворного пространства;
- среднее давление ликвора;
- биологические и физико-химические свойства.

2. Динамические:

- секреция (скорость, объем);
- резорбция (скорость, объем);
- циркуляция (объемная и линейная скорость);
- колебания давления (ликворные пульсации).

Важный параметр ликворной системы – это давление спинномозговой жидкости. Оно в разных отделах ликворосодержащей системы различно и меняется в процессе физиологического функционирования. В частности, его колебания вызваны деятельностью сердечно-сосудистой и дыхательной систем. Сильное влияние на величину ликворного давления в сторону его повышения имеют факторы, которые создают венозные застои в венах эпидурального пространства спинного мозга и полости черепа. К этим факторам относятся натуживание, кашель, чихание, громкая речь, плач, глубокое дыхание, давление на живот, яремные вены.

В спокойном состоянии, в нормальных физиологических условиях давление ликвора колеблется незначительно в зависимости от пульсации сосудов (от 10 до 15 мм вод. ст.) и дыхательных движений (от 30 до 50 мм вод. ст.). Различные психические влияния, включая боль, страх, ожидание пункции и др., вызывают колебания давления ликвора, чаще в сторону его повышения.

Физические основы количественной оценки потока с помощью фазоконтрастной МР-томографии

На заре изучения ликворосодержащей системы человека выявлено, что ликвороциркуляция представляет собой медленный однонаправленный процесс перемещения ликвора, тесно связанный с кровообращением [12]. Однако данные лучевой диагностики свидетельствовали о наличии не только медленного, но и быстрого ликворотока в некоторых отделах ликворосодержащей

системы. Позднее существование быстрых потоков ликвора подтвердили исследования особенностей характера распространения радиоактивной метки, введенной в дуральный мешок [13; 14].

Начиная с 1940-х гг. с целью выявления взаимосвязи между сердечным циклом и пульсацией ликвора использовались манометрические методы [15]. Несколько позже контрастная рентгеновская миелография впервые подтвердила эту взаимосвязь [16]. С развитием более чувствительного к потоку метода фазоконтрастной МРТ появилась возможность для детального изучения ликвородинамики.

При выполнении МР-томографических исследований цереброспинальная жидкость выглядит по-разному на T1- и T2-взвешенных изображениях (ВИ). Величина T1 в значительной мере зависит от размера молекул и их мобильности. Как правило, T1 минимально для тканей с молекулами среднего размера и мобильности, например для жировых тканей. Меньшие, более мобильные молекулы (в жидкости) имеют более высокое значение T1. Соответственно на T1-ВИ жидкость имеет темную окраску (гипоинтенсивный сигнал). Величина T2 зависит от физических и химических свойств тканей. Жидкости и подобные жидкостям ткани имеют длительное время T2 (МР-сигнал с течением времени исчезает медленно). Соответственно на T2-ВИ жидкость имеет яркую окраску (гиперинтенсивный сигнал) [17]. Особая ситуация складывается при анализе данных, полученных с помощью фазоконтрастной МРТ в кинорежиме. На этих динамических изображениях ликвор пульсирует с изменением интенсивности сигнала от яркого (фаза сокращения крупных артериальных сосудов) к темному (фаза расслабления крупных артериальных сосудов). На этапе визуального анализа кинопетли есть возможность оценить взаимоотношение ликворосодержащих полостей и пространств, оценить проходимость наиболее тонких структур, а после дальнейшей обработки могут быть получены количественные параметры ликвородинамики.

Применение фазоконтрастной МР-миелографии в клинике

Данные, полученные с помощью фазоконтрастной МРТ, изменили устоявшиеся в

медицине представления о движении ликвора. Показано, что для экстравентрикулярного потока ликвора характерно пульсирующее движение. Некоторые авторы [14] выдвинули гипотезу о том, что такое пульсирующее движение ликвора связано с периодическим расширением интракраниальных артерий. Пульсация крови вызывает пульсацию ликвора в краниоцервикальном соединении, а движение ликвора в Сильвиевом водопроводе отражает упругое расширение мозговой ткани. Исследование N. Alregin и соавт. [18] также было направлено на изучение движения цереброспинальной жидкости и спинного мозга под воздействием пульсации сосудов. Демонстрировано, что после притока артериальной крови к головному мозгу возникала волна оттока цереброспинальной жидкости через большое затылочное отверстие с отсрочкой в несколько миллисекунд. При этом венозный кровоток не вносил достоверного вклада в ликвородинамику, являясь высоковариабельным. Кроме того, S. Yamada и соавт. [19] в своем исследовании показали присутствие двунаправленного потока ликвора между III и боковыми желудочками мозга через отверстие Монро.

Таким образом, движение спинномозговой жидкости в полости черепа и спинномозговом канале имеет сложный пульсирующий характер и связано с сердечной деятельностью. В зависимости от фазы сердечного цикла движение ликвора имеет разное направление, т. е. ликвороток является бифазным. Полное смешивание потоков и двунаправленное движение ликвора может происходить на разных уровнях ЦНС.

Последние исследования [20] показали возможность использования фазоконтрастной МРТ для определения уровня продукции цереброспинальной жидкости в условиях нормы. Такие данные позволят расширить представления о механизмах авторегуляции продукции цереброспинальной жидкости в ответ на патофизиологические изменения, такие как связанная со старением мозговая атрофия или дегенерация. К тому же это единственная методика, позволяющая неинвазивно измерять подобные параметры.

В настоящее время специализированные импульсные последовательности для проведения МР-миелографии в динамическом режиме требуют существенной доработки. Необходима адаптация имеющихся подхо-

дов и разработка новых. Определенные модификации данной методики позволят максимально повысить ее информативность, сократить продолжительность обследования пациентов, получить максимум количественной и качественной диагностической информации, а также предоставят возможность детального исследования ликворосодержащих структур головного мозга.

Роль фазоконтрастной МРТ в комплексной оценке параметров ликвородинамики

Изменения в ликворной системе сопровождаются многими неврологическими и нейрохирургическими заболеваниями, и именно поэтому ее всестороннее исследование является актуальной проблемой современной медицины. Такие процессы, как гипертензионно-гидроцефальный синдром, мальформации мозга и желудочков, патология Арнольда – Киари, опухоли головного и спинного мозга, субарахноидальные кисты зачастую приводят к сдвигу в системе гемостаза цереброспинальной жидкости (дисбаланс между ее продукцией, движением и резорбцией). Вместе с тем существуют определенные трудности в диагностической оценке формирующихся изменений, а известные методики не позволяют адекватно оценить морфофункциональные особенности ликворосодержащих структур либо обладают рядом побочных эффектов, ограничивающих их использование. Именно поэтому среди нейрохирургов, неврологов и нейрорентгенологов остро стоит вопрос о внедрении в повседневную клиническую практику новых неинвазивных диагностических методов исследования ликвора, к которым на данный момент относится только фазоконтрастная МРТ.

В современной литературе подробно описаны особенности ликвородинамики на разных уровнях головного и спинного мозга: Сильвиев водопровод, IV желудочек мозга, большое затылочное отверстие, позвоночный канал [21–23]. Однако практически отсутствуют работы, посвященные комплексной оценке параметров перемещения цереброспинальной жидкости на всем протяжении центральной нервной системы. Более того, до конца не определены нормальные значения параметров ликвородинамики, поскольку выборки в зарубежных исследо-

ваниях чаще всего немногочисленны и малодостоверны. Еще одна проблема – это нестандартизованность параметров методики и получаемых значений для разных МР-систем и лабораторий. Именно поэтому наиболее актуальным направлением является разработка общих подходов и параметров методики фазоконтрастной миелографии с возможностью количественной оценки потока ликвора.

Таким образом, МРТ-изображения ликворной системы, полученные с помощью методики фазового контраста, являются достаточно достоверными и точными источниками морфофункциональной информации. С другой стороны, применение данной методики требует тщательного анализа получаемых количественных результатов прежде всего с анатомических и функциональных позиций с учетом особенностей конкретной патологии. Для развития данного диагностического подхода требуется доработка параметров методики фазового контраста, разработка специфических модификаций МР-последовательностей, а также упорядочивание и обобщение уже имеющихся данных.

Учитывая сложившуюся ситуацию, можно выделить несколько путей развития методики фазоконтрастной МРТ.

1. Сокращение длительности процедуры и улучшение пространственного разрешения, что позволит получать более точную информацию и проводить более качественный анализ и обработку данных.

2. Развитие данной методики в применении к различным патологическим состояниям с разработкой количественных критериев для каждого конкретного заболевания, что откроет новые перспективы в более ранней диагностике обозначенных проблем, а также облегчит контроль за их оперативным и консервативным лечением.

3. Комплексный многоуровневый четырехмерный анализ ликвородинамики в центральной нервной системе с цветовым картированием виртуальных частиц потока ликвора и возможностью его количественной оценки позволит проводить виртуальный анализ ЦНС и планировать оперативное лечение, что откроет новое направление совместной деятельности рентгенолога и нейрохирурга.

Несмотря на все преимущества и широкие перспективы дальнейшего развития и

совершенствования, метод фазоконтрастной МРТ только начинает всерьез восприниматься клиницистами. Он довольно сложен и предъявляет определенные требования к МР-томографу (напряженность магнитного поля – 1,5 Т и выше, возможность синхронизации с ЭКГ, мощная градиентная система, достаточно высокая скорость нарастания градиента и др.). До сих пор остается открытым вопрос о выборе локализации срезов для определения характеристик потока. Практически отсутствуют возрастные нормы таких параметров. Данные, полученные в разных лабораториях, варьируют в широких пределах, так как отличаются условиями измерений. Однако совершенствование этой методики, применение кинорежима с кардиосинхронизацией открыло новые возможности в исследовании динамических характеристик ликворотока, а сам метод постепенно занимает свое место в широком спектре методов лучевой диагностики.

Список литературы

1. *Летягин А. Ю., Тулупов А. А., Савелов А. А., Автаева М. В., Коростышевская А. М., Сорокина К. Н.* Использование МР-томографии для оценки лимфатической системы // Вестн. Новосиб. гос. ун-та. Серия: Биология, клиническая медицина. 2005. Т. 3, вып. 4. С. 71–83.
2. *Тулупов А. А., Летягин А. Ю., Савелов А. А., Коростышевская А. М.* Возможности магнитно-резонансной томографии в визуализации ликворотока // Вестн. Новосиб. гос. ун-та. Серия: Биология, клиническая медицина. 2005. Т. 3, вып. 1. С. 68–80.
3. *Хачатрян В. А., Севастьянов Т. В.* Очерки по патологии нервной системы. СПб., 1996. С. 229–241.
4. *Hegarty S. E., Millar J. S.* MRI in the Localization of CSF Fistulae: Is It of Any Value? // Clin. Radiol. 1997. Vol. 52, № 10. P. 768–770.
5. *Saint-Louis L. A.* Lumbar Spinal Stenosis Assessment with Computed Tomography, Magnetic Resonance Imaging, and Myelography // Clinical orthopaedics. 2001. Vol. 384. P. 122–136.
6. *Shafaie F. F., Wippold F. J., Gado M.* Comparison of Computed Tomography, Myelography and Magnetic Resonance Imaging in the Evaluation of Cervical Spondylotic Myelo-

pathy and Radiculopathy // *Spine*. 1999. Vol. 24, № 17. P. 1781–1785.

7. *Carriero A., Palubo L., Magarelli N., Tarfaro A.* Magnetic Resonance Angiography // *La Radiologia Medica*. 1997. Vol. 12. P. 30–39.

8. *Moran P., Moran R.* Imaging True Motion Velocity and Higher Order Motion Quantities by Phase Gradient Modulation Techniques in NMR Scanners // *Technology of Nuclear Magnetic Resonance: Society for Nuclear Medicine*. N. Y., 1984. P. 121–136.

9. *Корниенко В. Н., Пронин И. Н.* Диагностическая нейрорадиология. М., 2006.

10. *Ринк П. А.* Магнитный резонанс в медицине: Пер. с англ. М., 2003.

11. *Фридман А. П.* Основы ликворологии. Л., 1971.

12. *Бородин Ю. И., Песин Я. М.* Мозг и жидкие среды организма. Новосибирск, 2005.

13. *Greitz D.* Cerebrospinal Fluid Circulation and Associated Intracranial Dynamics. A Radiologic Investigation Using MR Imaging and Radionuclide Cisternography // *Acta Radiol. Suppl.* 1993. Vol. 386. P. 1–23.

14. *Greitz D., Hannerz J.* A Proposed Model of Cerebrospinal Fluid Circulation: Observations with Radionuclide Cisternography // *Am. J. Neuroradiol.* 1996. Vol. 17. P. 431–438.

15. *O'Connell J. E.* Vascular Factor in Intracranial Pressure and Maintenance of Cerebrospinal Fluid Circulation // *Brain*. 1943. Vol. 66. P. 204–228.

16. *Boulay G. D.* Pulsatile Movements in the CSF Pathways // *Br. J. Radiol.* 1966. Vol. 39. P. 255–262.

17. *Беличенко О. И., Дадвани С. А., Абрамова Н. Н., Терновой С. К.* Магнитно-резонансная томография в диагностике цереброваскулярных заболеваний. М., 1998.

18. *Alperin N., Vikingstad E. M., Gomez-Anson B., Levin D. N.* Hemodynamically Independent Analysis of Cerebrospinal Fluid and Brain Motion Observed with Dynamic Phase Contrast MRI // *Magn. Reson. Med.* 1996. Vol. 35, № 5. P. 741–754.

19. *Yamada S., Miyazaki M., Kanazawa H., Higashi M., Morohoshi Yu., Bluml S., Gordon J.* Visualization of Cerebrospinal Fluid Movement with Spin Labeling at MR Imaging: Preliminary Results in Normal and Pathophysiologic Conditions // *Am. J. Neuroradiol.* 2008. Vol. 249. P. 644–663.

20. *Huang T.-Y., Chung H., Chen M., Glang L.-H., Chin S.-C., Lee C.-S., Chen C.-Yu.* Supratentorial Cerebrospinal Fluid Production Rate in Healthy Adults: Quantification with Two-Dimensional Cine Phase-Contrast MR Imaging with High Temporal and Spatial Resolution // *Radiology*. 2004. Vol. 233. P. 603–608.

21. *Арутюнов Н. В., Петрайкин А. В., Корниенко В. Н.* Изучение ликворотока на основе магнитно-резонансной томографии // *Вопр. нейрохирургии*. 2000. № 3. С. 29–33.

22. *Lee J. H., Lee H. K., Kim J.K., Kim H., Park J., Choi C.* CSF Flow Quantification of the Cerebral Aqueduct in Normal Volunteers Using Phase Contrast Cine MR Imaging // *Korean J. Radiol.* 2004. № 5. P. 81–86.

23. *Quigley M. F., Iskandar B., Quigley M. A., Nicosia M., Haughton V.* Cerebrospinal Fluid Flow in Foramen Magnum: Temporal and Spatial Patterns at MR Imaging in Volunteers and in Patients with Chiari I Malformation // *Radiology*. 2004. Vol. 232, № 1. P. 229–236.

Материал поступил в редколлегию 20.01.2011