

Возможности магнитно-резонансной томографии в визуализации ликворотока

А. А. Тулупов, А. Ю. Летягин, А. А. Савелов, А. М. Коростышевская

Международный томографический центр СО РАН, Новосибирск;

Новосибирский государственный университет

Патологические процессы, развивающиеся в организме человека, практически всегда в основе патогенеза имеют механизм нарушения движения какой-либо из биологических жидкостей: крови, лимфы, цереброспинальной жидкости (ликвора), тканевой жидкости, мочи, жёлчи, кишечного содержимого, слизи дыхательных путей, околоплодных вод, внутриплевральной и внутриперитонеальной жидкостей. При этом известно, что основным компонентом в этих биологических объектах является вода [1]. Необходимо отметить, что в различных органах человеческого организма существуют весьма различные параметры перемещения жидкостей: линейная и объёмная скорость, характер взаимодействия жидкости с трубчатыми системами организма (в условиях нормы и при патологическом изменении стенок и просвета), состояния свёртывающе-антисвёртывающей системы крови и лимфы и аналог этих механизмов в других жидкостях (выпадение конкрементов, сгущение и др.) [1, 2].

Лишь в прошлом веке были изобретены и внедрены в клиническую практику диагностические технологии, позволяющие прижизненно визуализировать движение перечисленных биологических жидкостей в человеческом организме: 1) радиоизотопная диагностика; 2) эндо-

скопия с прижизненной микроскопией; 3) ультразвуковое исследование (УЗИ) с доплеровским сканированием; 4) контрастная рентгеновская ангиография (КРА) и миелография; 5) дигитальная субтракционная ангиография (ДСА); 6) рентгеновская контрастная компьютерная томография (КТ); 7) спиральная и мультиспиральная рентгеновская контрастная компьютерная томография (МСКТ), МСКТ-ангиография и МСКТ-миелография; 8) позитрон-эмиссионная томография (ПЭТ); 9) магнитно-резонансная томография (МРТ), МР-ангиография (МРА) и МР-миелография.

Из всех вышеперечисленных методов, МРТ является уникальным, поскольку именно атомы водорода молекул воды и органических соединений дают «основу» МР-сигнала [3, 4]. Остальные методы позволяют оценить процесс движения воды в организме только опосредованно, по перемещению различных меток (радиоактивных меток-изотопов, рентгенпоглощающих растворимых структур, красителей, иммунологических структур-меток и др.), введение которых в организм человека нельзя признать полностью безопасным и безвредным. С другой стороны, такое вмешательство нельзя признать идеальным методологическим приёмом, поскольку введение инородного агента в достаточно хрупкую биосистему человеческого

© Тулупов А. А., Летягин А. Ю., Савелов А. А.,
Коростышевская А. М., 2005

организма, в той или иной мере, приводит к неконтролируемому изменению параметров перемещения биожидкости, т. е. к потере «чистоты» исследования.

Одной из перспективных областей приложения вышеперечисленных методов лучевой диагностики является оценка движения цереброспинальной жидкости в норме и при патологии. Нормальное функционирование центральной нервной системы человека невозможно без продукции, депонирования, перемещения и реабсорбции цереброспинальной жидкости, поскольку она несёт функции питания и дренирования тканей головного и спинного мозга, создавая для них специфическую внутреннюю среду, нарушение параметров которой ведёт к тяжёлым заболеваниям и гибели организма. Эти процессы, по существу, являются аналогами работы лимфатической системы организма.

Существующие методы визуализации ликворосодержащих полостей головного и спинного мозга. Методы визуализации ликворных пространств можно разделить на статические и динамические (в соответствии с разделением основных физиологических параметров ликворной системы), но, прежде всего, среди методов диагностики нарушений ликворциркуляции выделяют инвазивные и неинвазивные. Инвазивные методы исследования предполагают введение в ликворные пространства головного и спинного мозга контрастного вещества.

Для визуализации ликворосодержащих полостей головного и спинного мозга до сих пор используется контрастная рентгеновская миелография и пневмоэнцефалография. Однако, такие диагностические манипуляции инвазивны, сопряжены с лучевой нагрузкой, высоким риском тяжёлых инфекционных и неврологических осложнений.

Контрастная рентгеновская миелография — рентгенография позвоночного канала после искусственного контрастирования его подпаутинного простран-

ва. Проводится для исследования ликворной системы спинного мозга с целью выявления блока движения ликвора в субарахноидальном пространстве при различных заболеваниях (опухоли, арахноидиты).

Различают нисходящую и восходящую миелографию. При нисходящей миелографии применяется «тяжёлое» (т. е. более плотное по отношению к цереброспинальной жидкости) контрастное вещество (липоидол, майодил). Оно обычно вводится путём субокципитальной пункции сидящему больному и накапливается над патологическим процессом, блокирующим ликворные пути (опухоль, выпавший фрагмент межпозвонкового диска и др.).

Для восходящей миелографии чаще используется газ (кислород или обычный воздух), процедура носит название пневмомиелографии. Вводят газ через поясничный прокол. Газовый пузырь поднимается вверх и останавливается под патологическим очагом, блокирующим ликворные пути. Для восходящей миелографии используют также «лёгкие» рентгеноконтрастные вещества.

Изотопная миелография относится к методам радиоизотопной диагностики. Она заключается в оценке проходимости субарахноидального пространства посредством сканирования или радиометрии (количественной оценки радиоактивности) после эндолюмбального введения альбумина человеческой сыворотки, меченного радиоактивным изотопом.

Пневмоэнцефалография — вид контрастной рентгенографии черепа. Он даёт возможность судить о состоянии путей циркуляции спинномозговой жидкости. Кроме того, она позволяет судить о величине желудочков, их расположении, форме и состоянии субарахноидальных пространств головного мозга. Метод применяется для диагностики гидроцефалии, определения локализации объёмных процессов. Воздух, введённый в конечную цистерну после люмбальной

пункции (в положении сидя), поднимается по подпаутинному пространству спинного мозга в мозжечково-мозговую цистерну, проходит в IV желудочек через срединную и боковую апертуры, затем через Сильвиев водопровод проникает в III желудочек, и далее через межжелудочковые отверстия в боковые желудочки. Тотчас же после введения воздуха производятся рентгеновские снимки черепа в двух проекциях.

На снимках видны содержащие воздух полости мозга. Можно обнаружить незаполнение одного из желудочков воздухом или смещение его в сторону в результате спаек, имеющих после воспалительного процесса. Иногда видно кистозное расширение субарахноидальных пространств, или, наоборот, вследствие слипчивого процесса воздух на определенном участке не контрастирует подпаутинные пространства, что позволяет диагностировать кистозный или слипчивый арахноидит.

Метод замедленной направленной пневмоэнцефалографии позволяет с помощью фракционного введения небольших порций воздуха и частых контрольных снимков поочередно выявлять различные отделы ликворной системы головного мозга.

Теоретические и модельные исследования. В момент систолического прилива крови к головному мозгу наступает компенсаторное вытеснение ликвора через соответствующие отверстия. Колебания давления крови вызывают колебания давления в ликворной системе в виде волны. Возникающая в черепе волна систолического повышения давления проникает в люмбальную часть спинного мозга во время диастолы, но эти пульсовые волны не приводят к усилению тока спинномозговой жидкости, а вызывают лишь перемешивание ликвора.

Известно, что ликвороциркуляция представляет собой медленный, односторонний процесс перемещения ликвора [5]. Однако данные лучевой диагно-

стики, а также наблюдения нейрохирургов при проведении оперативных вмешательств, свидетельствовали о наличии не только медленного, но и быстрого ликворотока в некоторых отделах ликворосодержащей системы. Радиоизотопные исследования выявили распространение маркера из люмбального пространства в полость черепа [6, 7]. Позднее, существование быстрых потоков ликвора подтвердили исследования особенностей характера распространения радиоактивной метки, введённой в дуральный мешок [8, 9].

Согласно квазистатической модели ликвороциркуляции, равновесный уровень спинномозговой жидкости определялся главным образом продукцией и резорбцией ликвора, но в этой модели ликворной системы не учитывали наличия быстрых потоков. Последние теоретические модели ликвородинамических процессов выявили наличие таких потоков и объяснили их возникновение. Модельные испытания и клинические наблюдения выявили связь между характеристиками быстрых перемещений ликвора и традиционно принятыми в ликворологии показателями, такими как интракраниальное давление и люмбальное давление ликвора.

М. Ursino и соавт. [10] предложили математическую модель механизмов авторегуляции ликворотока и локального мозгового кровотока, связывающую изменения артериального и внутричерепного давления с ликвородинамическими параметрами и объёмными колебаниями мозговой ткани. В этой модели использована электрогидродинамическая аналогия ликворной системы, подобраны гемодинамические и гидродинамические параметры. В итоге, составлено дифференциальное уравнение, которое решалось численными методами для случаев авторегуляции ликворотока и объёма локального мозгового кровотока при постепенном падении артериального давления с оценкой изменения внутрече-

репного давления. Представленная модель позволяла воспроизводить пульсации ликвора и сопутствующие изменения внутричерепного давления в норме и при диспропорциональном усилении пульсации ликвора. На модели были воспроизведены условия некоторых функциональных тестов для исследования гидродинамических характеристик ликворной системы. Например, вычисления для условий гиперкапнии показали, что пульсации ликворного давления возрастают, а при гипервентиляции — снижаются. Основной задачей этих работ являлось моделирование механизмов авторегуляции мозгового кровотока при нарушениях артериального давления, а моделирование ликвородинамических изменений происходило попутно. Тем не менее, результаты моделирования впервые подтвердили наличие быстрых пульсаций ликвора, связанных с артериальным кровотоком и внутричерепным давлением.

Другие исследователи [11, 12] сделали попытку применить комплексный, системный подход к анализу взаимосвязи гемодинамических и ликвородинамических характеристик на основе результатов фазо-контрастной МРТ, полученных *in vivo*, и их использование для оценки механических свойств мозга и внутричерепного давления. При этом, краниоспинальная система рассматривалась как отдел черепа с практически жёсткой оболочкой, соединённый с более податливым спинальным отделом через канал ликворотока. Было принято, что пульсации ликвора вызваны пульсацией крови и модулированы механической податливостью краниоспинальной системы [12]. Исследования проводились в соответствии с принципом Монро—Келли, согласно которому полный внутричерепной объём постоянен. Такой системный подход был применён к исследованию четырёх пациентов с мальформацией Arnold—Chiary I. Результаты исследований показали большую вариабельность гемо-

и гидродинамических характеристик у пациентов. Частично такие различия могли быть вызваны вариабельностью патологических изменений у пациентов, например, наличием или отсутствием фистулы или гидроцефалии. Был сделан вывод, что фазо-контрастная МРТ позволяет визуализировать и количественно оценить ликворную систему в норме и при различных патофизиологических процессах, особенно в отделах шеи и спинного мозга как в до-, так и в послеоперационном периоде. Однако, полученные данные требуют дальнейшего анализа, поисков корреляций и стандартизации.

В работах других авторов [13, 14] выявлена связь между артериальными и ликворными пульсациями. Показано, что характер ликворотока напрямую связан с сердечной деятельностью. Если бы отток ликвора происходил только через пахионовы грануляции и венозную систему, следовало бы ожидать, что венозный кровоток как и артериальный, каким-то образом влияет на ликворные пульсации. Однако такой зависимости не было обнаружено. Исследователи объяснили данный факт преобладанием артериального влияния на ток ликвора и вариабельностью венозного кровотока. Влияние венозных пульсаций на амплитуду ликворных пульсаций имело место только в условиях венозной компрессии. Также было показано, что характер ликворотока в субарахноидальном пространстве весьма постоянен и установлена высокая воспроизводимость формы кривых скорости ликворотока.

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

на разных уровнях ЦНС. Эксперименты на фантоме [9] показали, что смешивание жидкости более эффективно происходит в присутствии хорды. Наиболее быстрое смешивание происходит в субарахноидальном пространстве спинного мозга, особенно в шейном и грудном отделах. В конвексимально расположенном субарахноидальном пространстве ликворное смешивание происходит незначительно из-за малых ликворных пульсаций [15]. Характер движения ликвора определяют тесная связь между движением ткани мозга и кровотоком, а также сложная геометрия ликворного пространства.

Диагностические характеристики патологических изменений ликворных пространств могут быть как статическими, так и динамическими. Они могут проявляться нарушениями симметрии интра- и экстрацеребральных отделов, изменением относительных и абсолютных размеров желудочков, цистерн, субарахноидального пространства, отсутствием сообщения между ними, нарушениями секреции или резорбции ликвора, а также изменением механических (упругих) свойств паренхимы.

КТ- и МРТ-миелография и цистернография. С появлением компьютерной томографии были разработаны и внедрены в диагностическую практику методики КТ-миело- и цистернографии, позволившие локализовать и морфологически охарактеризовать окклюзии, фистулы, ликворею, травматические поражения и другие виды патологии, оценить вторичные эффекты, вызываемые, например, опухолью. Однако, высокая тканевая контрастность, присущая МРТ, сделала её основным неинвазивным методом визуализации ликворных пространств.

В диагностике локализации как спонтанных, так и травматических ликворных фистул у 50 пациентов S. E. Hegarty и соавт. [16] использовали фронтальные Т2-ВИ. По их данным, МРТ имело низ-

кую специфичность в обнаружении ликворных фистул. Сравнительный анализ результатов КТ-цистернографии и неинвазивной МР-цистернографии показал, что чувствительность последней в выявлении ликворных фистул выше, чем у КТ-цистернографии. Кроме того оказалось, что быстрое движение ликвора в Сильвиевом водопроводе мозга и внутри IV желудочка приводит к снижению сигнала от ликвора (эффект «flow-void») на аксиальных Т2-ВИ МР-томограммах.

Была проведена оценка информативности визуализации ликворного пространства люмбосакральной области методом МРТ с использованием поверхностной катушки и с подавлением артефактов движения [17]. Однородность сигнала от ликвора оценивали визуально по Т2-ВИ МРТ у 60 человек в магнитных полях различной напряжённости (1,5 и 0,1 Тл). Ликвор выглядел однородным в 82 % и 73 % случаев в разных магнитных полях соответственно. Типы и локализации неоднородностей не соотносились с локальным сужением дурального мешка. Различия интенсивностей сигнала от ликвора в верхнем и нижнем отделах дурального мешка составили менее 10 % в 73 % всех случаев. Авторы пришли к выводу, что визуализация ликвора в люмбосакральных пространствах у пациентов с умеренным сужением дурального мешка и без сильного сколиоза даёт полезную информацию для выявления спинальных патологий, даже при МРТ в слабых магнитных полях.

F. F. Shafaie и соавт. [18] провели ретроспективное радиологическое исследование пациентов с дегенеративными поражениями спинного мозга для установления соотношения рейтингов между КТ-миелографией и Т2-ВИ МРТ. Ими рассмотрены расхождения в интерпретации данных КТ-миелографии и МРТ, надёжность этих методов визуализации и их диагностические возможности. Соответствия в интерпретации поражений диско-verteбральных соединений и со-

единений суставных поверхностей составили 144 из 240 (60 %), 143 из 160 (89 %) соответственно, что показало умеренное согласие между результатами разных диагностических методов. При оценке степени компрессии спинального канала результат составил 199 из 240 (82,9 %). Авторы показали, что в большинстве случаев соответствие КТ-миелографии и МРТ лишь умеренное и эти диагностические методы следует считать дополняющими один другой.

В другой работе [19] рассмотрены сходство и особенности КТ, КТ-миелографии и МРТ как методов визуализации при выявлении различных патологий спинного мозга. Дегенеративные стенозы поясничного отдела позвоночного канала вызываются разными факторами: грыжей диска, гипертрофией суставной поверхности, спондилолистезами и компрессионными переломами, но чаще всего стенозы обусловлены комбинацией этих факторов. Авторы показали, что используемые в рутинной диагностике КТ, КТ-миелография и МРТ имеют свои преимущества и недостатки. Точность этих методов примерно одинакова и они дополняют друг друга. Наименее инвазивный метод — МРТ, его рекомендуют применять первым, поскольку он не требует введения контрастного вещества.

К достоинствам КТ- и МР-цистернографии следует отнести возможность проведения 3D исследований, которые используются для количественных оценок параметров ликворной системы, таких как объёмы желудочковой системы и субарахноидальных ликворных пространств, а также объём свода черепа и паренхимы мозга. Эти методики позволяют оценивать структурно-анатомические характеристики ликворной системы, визуализировать геометрию ликворных пространств.

Так с помощью неинвазивного, прямого метода 3D FASE (Fast Asymmetric Spin Echo) измерения внутричерепного объёма спинномозговой жидкости про-

ведена оценка субарахноидальных и желудочковых объёмов ликвора у пациентов с расширением желудочков [20]. Полученные данные показали, что расширение желудочков и высокое отношение вентрикулярного и субарахноидального объёмов с высокой вероятностью указывает на гидроцефалию нормального давления.

Методы КТ- и МР-цистернографии и миелографии позволяют изучать медленные перемещения спинномозговой жидкости в течение достаточно больших промежутков времени (десяtkи минут, часы). Визуальная оценка динамических характеристик ликворотока (скорости и ускорения) и получение количественных оценок ликворотока такими статическими методами невозможны. Поэтому появляется необходимость в разработке методов визуализации потоков, которые могли бы с высокой диагностической точностью оценивать как быстрые, так и медленные перемещения ликвора.

Возможности фазо-контрастной МРТ в визуализации и количественной оценке потока. Для кодирования скорости потока в импульсной последовательности используют дополнительные градиентные импульсы, благодаря которым в МР-сигнале движущихся протонов появляется добавочный фазовый сдвиг, зависящий от скорости движения спинов. У неподвижных, стационарных спинов дополнительный фазовый сдвиг отсутствует. Получаемое изображение содержит информацию только о движущихся с потоком спинов, сигнал от протонов стационарных тканей отсутствует. Метод фазового контраста чаще используется для визуализации относительно быстродвижущихся протонов крови. Однако, используя синхронизацию импульсной последовательности с ЭКГ, можно получить МР-изображения ликворотока в тех местах, где спинномозговая жидкость движется относительно быстро (сравнимо со скоростью кровотока), например, в большом водопроводе мозга или в области краниовертебрального перехода.

При просмотре изображений, полученных в последовательные фазы сердечного цикла в кино-режиме, можно визуализировать пульсовое движение ликвора, а также вычислить как средний поток за кардиоцикл, так и мгновенные значения скорости потока в отдельные фазы сердечного цикла [21, 22].

Времяпролётная методика визуализации потока даёт, в основном, морфологическую характеристику и лишь косвенно характеризует скорости движения протонов. Диапазон применения времяпролётной методики ограничен величиной T1 крови и значением скорости кровотока в сосуде. Яркость сигнала на фазо-контрастных изображениях соответствует непосредственно скорости движения спинов. Таким образом, фазо-контрастные методы позволяют не только визуально оценить движение ликвора или крови в сосуде, но и получить количественные оценки скорости этого движения. При регистрации данных необходимо откалибровать интенсивность каждого пикселя по скорости движения потока. После этого можно наблюдать изменения скорости кровотока во все фазы кардиоцикла и получить зависимости количественных характеристик этого движения: линейную и объёмную скорости движения спинов с потоком.

С помощью метода фазо-контрастной МРТ выявлены быстрые токи ликвора и получены визуальные и количественные характеристики скорости ликворотока [13, 14, 23, 24]. Авторы измерили линейную скорость течения спинномозговой жидкости. Оказалось, что с наибольшей скоростью ликвор течёт в прехордальном пространстве, предмостовой части мозжечково-мозговой цистерны, межножковой цистерне, постхордальном пространстве и в водопроводе мозга.

Данные, полученные с помощью фазо-контрастной МРТ, изменили устоявшиеся в медицине представления о движении ликвора. Было показано, что для экстравентрикулярного потока ликвора

характерно пульсирующее движение. Такой характер движения ликвора вызывает быстрое перемешивание спинномозговой жидкости в субарахноидальном пространстве. Кроме того, результирующий отток ликвора был выявлен в Сильвиевом водопроводе, что подтверждало общепринятую точку зрения, о том, что основная продукция ликвора имеет место в хориоидальных сплетениях желудочков [15, 25]. Была выдвинута гипотеза, что такое пульсирующее движение ликвора связано с периодическим расширением интракраниальных артерий. Пульсация крови вызывает пульсацию ликвора в кранио-цервикальном соединении, а движение ликвора в Сильвиевом водопроводе отражает упругое расширение мозговой ткани [8]. Более поздние исследования подтвердили, что концепцию сплошного потока ликвора к пахионовым грануляциям следует пересмотреть [26], т. к. ликвор адсорбируется не только посредством этих структур, но и другими различными путями в кровеносную и лимфатическую систему организма.

Метод фазо-контрастной МРТ только начинает всерьёз восприниматься клиницистами. Он довольно сложен и предъявляет определённые требования к МР-томографу. До сих пор остаётся открытым вопрос о выборе локализации срезов для определения характеристик ликворотока. Практически отсутствуют возрастные нормы таких параметров. Данные, полученные в разных лабораториях, варьируют в широких пределах, т. к. отличаются условиями измерений. Однако, усовершенствование этой методики, применение кино-режима с кардиосинхронизацией открыло новые возможности в исследовании динамических характеристик ликворотока, а сам метод постепенно занимает своё место в широком спектре методов лучевой диагностики.

Клиническое применение фазо-контрастной МРТ. Изучение ликвороциркуляции методами МРТ начало примерно

в 1990 г. До конца девяностых годов число публикаций, посвящённых изучению ликвороциркуляции методом фазо-контрастной МРТ, было сравнительно небольшим (примерно 5—7 в год), они носили скорее поисковый характер. Но после 1998 года количество работ резко возросло. В ранних публикациях авторы пытались определить количественные критерии оценки движения ликвора, обсуждалась методология исследования ликворной системы в отсутствии патологии. Лишь в последние годы начали появляться клинические работы, посвящённые использованию методики фазового контраста в изучении не только нормального функционирования ликворной системы, но и при различных патологических состояниях [27—30].

М. Freund и соавт. [29] провели измерения пульсирующего движения ликвора в спинальном канале (шейном, грудном и люмбальном отделах). Была оптимизирована и проверена на пациентах импульсная последовательность при четырёх значениях скорости кодирования (4, 8, 12, 16 см/с). Авторы определили скорости ликворотока в указанных отделах спинного мозга у здоровых добровольцев и у пациентов с посттравматической сирингомиелией. Наилучшими была признана скорость кодирования 12 см/с — в краниоцервикальном отделе, 6 см/с — в грудном и люмбальном отделах. Модельные испытания показывают, что при стенозе позвоночного канала скорость ликворотока увеличивается. Авторы пришли к заключению, что с помощью фазо-контрастной МРТ можно получить количественные характеристики пульсирующего движения ликвора в спинальном канале, а также определить изменения скоростей ликворотока, вызванные стенозом. Учитывая высокую индивидуальную вариабельность, полученные ликвородинамические данные требуют дальнейшего изучения. Результаты свидетельствовали о том, что выявление характера движения ликвора при

посттравматических поражениях спинного мозга может изменить тактику терапевтического лечения.

В другой работе [30] проанализированы данные объёмных скоростей движения спинного мозга и ликвора через поперечное сечение в группе здоровых добровольцев и пациентов с мальформацией Arnold—Chiary I. У 14 из 18 пациентов были обнаружены сирингомиелитические полости. Всем испытуемым проводили фазо-контрастную МРТ с кардиосинхронизацией на уровне С2 позвонка с кодированием скорости 10 см/с в краниокаудальном направлении. Отмечено значимое повышение максимального систолического и диастолического движения спинного мозга у больных с синдромом Arnold—Chiary I по сравнению с нормой. Также обнаружено достоверное повышение максимального систолического движения спинного мозга у пациентов с сирингомиелией. Авторы пришли к заключению, что причиной обструкции большого затылочного отверстия у пациентов с мальформацией Arnold—Chiary I является внезапное смещение вниз (каудально) спинного мозга в систолу, и снижение сопротивления от спинномозговой жидкости в диастолу.

С целью определения динамики движения спинномозговой жидкости проведено исследование здоровых добровольцев и больных с аномалией Arnold—Chiary I [31]. Всем испытуемым была проведена фазо-контрастная МРТ с кардиосинхронизацией. Было установлено, что динамика ликвора зависит от возраста: отмечена разница в скорости ликворотока в группах здоровых детей и здоровых взрослых. У детей максимальный каудальный ликвороток оказался выше во всех областях интереса, особенно в плоскости большого затылочного отверстия и в отверстии Мажанди, где у детей скорость движения ликвора на 50 % выше, чем у взрослых.

В 2003 году гипотеза о том, что у пациентов с мальформацией Arnold—Chiari I происходит увеличение максимальных скоростей ликворотока в большом затылочном отверстии, была снова проверена [32]. Всем испытуемым проводили фазоконтрастную МРТ с кардиосинхронизацией в аксиальной плоскости с кодированием скорости в краниокаудальном направлении в 10 см/с. В ходе обследования у всех пациентов выявлена неоднородность интенсивности сигнала от ликвора в области большого затылочного отверстия. Также были отмечены большие различия в скоростях ликворотока в передних и задних частях субарахноидального пространства. Самые высокие систолические и диастолические скорости определялись впереди от спинного мозга. У большинства пациентов самые высокие скорости определялись в диастолу. В некоторых случаях краниальный поток ликвора четко определялся в одной части субарахноидального пространства и в то же время в другой области регистрировался каудальный ликвороток. Максимальные скорости ликворотока в систолу у пациентов значительно превышают те же параметры у здоровых добровольцев. Максимальные скорости ликворотока в диастолу у больных превышают максимальные скорости движения ликвора у здоровых добровольцев, но эта разница не достоверна.

J. Heiss и соавт. [33] измеряли скорость движения спинномозговой жидкости в сириингомиелитической полости, в области большого затылочного отверстия, в передних и задних частях субарахноидального пространства на уровне C5—C6. Было отмечено, что движение ликвора в этих отделах характеризуется прерывистостью как в систолу, так и в диастолу.

N. Watabe и соавт. [34] исследовали изменения ликворотока у больных шейным спондилитом. Для определения направления и скорости ликворотока в вентральных отделах субарахноидального

пространства на уровне C1 и Th1 использовали фазо-контрастную МРТ с кардиосинхронизацией в кино-режиме. Формы сигнала изменения скорости значительно различались у здоровых добровольцев, пациентов с симптоматикой и у пациентов до операции. Уменьшение скорости значительно коррелировало с тяжестью миелопатии и процентом редукции спинного мозга. Пациенты с тяжелой миелопатией и при редукции площади спинного мозга более 30 % показали значительное снижение скорости ликворотока по сравнению с пациентами со слабой миелопатией и компрессией менее 30 %. Изменения скорости не коррелировали с множественностью зон поражения и уровнем максимальной компрессии мозга. В итоге, показано, что данный метод МР-визуализации позволяет количественно и неинвазивно оценить изменения цереброспинального ликворотока у пациентов с цервикальной миелопатией.

В работе R. Parkkola и соавт. [35] с помощью этого метода было количественно охарактеризовано движение ликвора в Сильвиевом водопроводе у детей с нормальными и расширенными желудочками мозга. Значения линейной и объемной скорости ликвора в водопроводе мозга демонстрируют значительные индивидуальные вариации, хотя частично пересекаются. Оказалось, что количественные оценки скорости ликворотока методом фазо-контрастной МРТ выявляют как снижение, так и возрастание скорости ликворотока при стенозе водопровода мозга.

M. C. Henry-Feugas и соавт. [36] провели анализ гидродинамических нарушений ликворотока при гидроцефалии у взрослых. У больных с активной и обструктивной формой гидроцефалии длительность пульсаций каудального движения ликвора была значительно укорочена. Длительность цервикального движения ликвора в диастолу была близка к таковой в контрольной группе и у па-

циентов со стабильной гидроцефалией. МР-анализ показал, что как при обструктивной, так и при открытой гидроцефалии, выявляются различия краниоспинального движения спинномозговой жидкости по сравнению с группой здоровых добровольцев.

В работе P. Brugieres и соавт. [37] методом 3D фазо-контрастной МРТ оценивали движение ликвора в кистах спинного мозга и в субарахноидальном пространстве у пациентов с сирингомиелией, сопровождающейся мальформацией Arnold—Chiary I. Пациентам проводили исследование цервикального отдела с привязкой к частоте сердечных сокращений с кодированием скорости в кранио-каудальном направлении 10 см/с. В полости фистул и в перикистозных субарахноидальных пространствах наблюдалось пульсирующее движение ликвора. В больших кистах и у пациентов со слабыми клиническими проявлениями как систолические, так и диастолические скорости были выше.

M. Dujovny и соавт. [38] исследовали изменения внутримозгового кровотока, влияние атмосферного давления, а также гидродинамические изменения ликворотока у пациентов с дефектами черепа после трепанации. Для определения артериального, венозного и ликворного потоков, направленных вне и внутрь черепа, была использована динамическая фазо-контрастная МРТ до и после краниопластики. После закрытия черепа отмечено умеренное увеличение венозного оттока и двукратное увеличение краниокаудального ликворотока в систолу.

D. Chu и соавт. [39] использовали этот метод для изучения влияния интракраниальных механических факторов (податливость мозга и гидродинамическое сопротивление ликвора) на пульсацию спинномозговой жидкости под воздействием внутрочерепного кровотока и определения передаточной функции между пульсациями крови и ликвора ниже большого затылочного отверстия. Они

доказали, что при возрастании как податливости, так и сопротивления спинномозговой жидкости взаимосвязь между высокочастотными компонентами цервикального ликворотока и транскраниального кровотока снижается.

O. Baledent и соавт. [28] оценивали временные и амплитудные характеристики кровотока и ликворотока и их взаимосвязь. Оказалось, что расширение мозга быстро компенсировалось оттоком спинномозговой жидкости, тогда как желудочковый ликвороток давал незначительный вклад.

Таким образом, многочисленные исследования ликвородинамических характеристик мозга с помощью фазо-контрастной МРТ позволяют не только визуализировать нарушения движения ликвора, но и количественно оценить основные ликвородинамические параметры: ударный объём, взаимосвязь изменения амплитуд внутрочерепного давления, движения крови и ликвора.

Тем не менее, данная методика только начинает выходить за рамки экспериментально-исследовательских работ. До сих пор остаётся открытым вопрос о выборе значений для кодирования скорости ликворотока в различных отделах ликворной системы, о локализации и направлении среза для определения скоростей ликворотока и ударного объёма. Значения ликвородинамических характеристик, полученные разными исследовательскими коллективами для пациентов с разными патологическими изменениями относятся к различным возрастным группам, значительно варьируют. Кроме того, выборки пациентов малы, данные трудно сопоставимы.

Возможности МР-уромиелографии (MYUR). Метод разработан фирмой «Bruker». Он позволяет получать сильно T2-взвешенные изображения для визуализации полостей и пространств, содержащих неподвижную (кисты) или медленнотекущую (ликвор) жидкость без использования дополнительного контра-

ста и лучевой нагрузки. МYUR-методика доступна в двухмерном и трёхмерном режимах и значительно превосходит контрастную рентгеновскую миелографию и пневмоэнцефалографию [3, 40].

В нашей лаборатории разработана методика кино-МYUR. Этот метод позволяет визуализировать динамику перистальтического движения свободной жидкости по полым биоструктурам: желчевыводящим, мочевыносящим путям, лимфатическим сосудам, ликворосодержащим пространствам спинного и головного мозга [4, 41].

Методика кино-МYUR имеет основные приложения: МР-кинолимфография, МР-киномиелография, МР-киноурография, МР-киноцистография, МР-кинохолангиография.

Методика кино-МYUR в режиме МР-киномиелографии позволяет визуализировать движение свободной жидкости по ликворосодержащим пространствам спинного и головного мозга и имеет следующие преимущества [1, 4]: отсутствие инвазивных процедур (без введения контрастного средства); отсутствие ионизирующего излучения; высокая чувствительность и специфичность; прямая оценка (наличия) двигательной активности полых биоструктур и физиологических ритмов движения биологических жидкостей по ним.

Поскольку время сканирование одного кадра по методике кино-МYUR составляло всего около 10 секунд, существует возможность получать до 15—30 кадров за 2,5—5,0 минут эксперимента: каждый кадр отображает МРТ-картину состояния ликворосодержащих полостей и пространств за десятисекундный промежуток, а исследование в целом — динамические характеристики изменения объёма цереброспинальной жидкости в желудочках и подбололочечных пространствах головного и спинного мозга за несколько минут.

Заключение. МРТ остаётся очень достоверным и эффективным диагностиче-

ским методом в неврологии, нейрохирургии и ангиологии. В результате МР-томографического исследования головы врач получает набор послойных изображений и имеет возможность проведения как качественного, так и количественного анализа полученных срезов. Качественный анализ определяет топiku и структуру патологического очага, что определяет специфичность метода. Количественный анализ МРТ-изображения позволяет определить МР-интенсивность сигнала, МР-контраст, а при использовании специальных методик сканирования определить специфические параметры ликвородинамики (линейную скорость, ударный объём и др.) и кровотока.

За последние годы МР-томография превращается из метода простой визуализации в метод, позволяющий получать информацию о функциональном состоянии той или иной части головного мозга, системы кровообращения и ликвороциркуляции. Именно на этой задаче сосредоточились на данный момент усилия и стремления исследователей.

Разработка модификаций методик МРТ с целью оптимизации качества и контрастности томограмм, уменьшения времени обследования пациента, а также развития и внедрения этих методик в диагностическую практику, определения признаков и параметров нормы и патологии является наиболее перспективным направлением в МРТ.

Изучение особенностей движения биологических жидкостей (крови, ликвора) современными методами лучевой диагностики (МСКТ, МРТ) в норме и при патологии является приоритетным направлением не только в биологии, но и в медицине.

Современные методики МРТ позволяют регистрировать не только «статические» или «усреднённые» томограммы, но и фиксировать ритмические изменения циркуляции ликвора или изучать состояние сосудистого русла в различные моменты сердечного цикла.

ЛИТЕРАТУРА

1. Летагин А. Ю. Диагностические возможности МРТ-методики кино-MYUR // *Мат. VI Международного семинара по магнитному резонансу (спектроскопия, томография и экология)*. Ростов-на-Дону, 2002. С. 46—47.
2. Бородин Ю. И., Астахова Т. А., Астахов В. В. и др. Методы лимфосанации в клинической и оздоровительной медицине // *Бюллетень СО РАМН*. 2000. № 2. С. 99—101.
3. Коновалов А. Н., Корниенко В. Н., Пронин И. Н. *Магнитно-резонансная томография в нейрохирургии*. М., 1997.
4. Сагдеев Р. З., Летагин А. Ю. Магнитно-резонансная томография // *Бюллетень СО РАМН*. 2000. № 2. С. 134—142.
5. Фридман А. П. *Основы ликворологии*. Л., 1971.
6. Di Chiro G. Observation on the circulation of the cerebrospinal fluid // *Acta Radiol. Diagn.* 1966. Vol. 5. P. 988—1002.
7. Di Chiro G. Movement of cerebrospinal fluid in human beings // *Nature*. 1964. Vol. 204. P. 290—291.
8. 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.
9. Greitz D., Hannerz J. A proposed model of cerebrospinal fluid circulation: observations with radionuclide cisternography // *Am. J. Neuroradiol.* 1996. Vol. 17. P. 431—438.
10. Ursino M., Giulioni M., Lodi C. A. Relationships among cerebral perfusion pressure, autoregulation, and transcranial Doppler waveform: a modeling study // *J. Neurosurg.* 1998. Vol. 89, № 2. P. 255—266.
11. Alperin N., Lee S., Loth F. et al. MR-Intracranial Pressure (ICP): A Method to Measure Intracranial Elastance and Pressure Noninvasively by Means of MR Imaging: Baboon and Human Study // *Radiology*. 2000. Vol. 217. P. 877—885.
12. 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.
13. Bhadelia R. A., Bogdan A. R., Kaplan R. F., Wolpert S. M. Cerebrospinal fluid pulsation amplitude and its quantitative relationship to cerebral blood flow pulsations: a phase-contrast MR flow imaging study // *Neuroradiology*. 1997. Vol. 39, № 4. P. 258—264.
14. Bhadelia R. A., Bogdan A. R., Wolpert S. M. Cerebrospinal fluid flow waveforms: effect of altered cranial venous outflow. A phase-contrast MR flow imaging study // *Neuroradiology*. 1998. Vol. 40, № 5. P. 283—292.
15. Enzmann D. R., Pelc N. J. Normal flow patterns of intracranial and spinal cerebrospinal fluid defined with phase-contrast cine MR imaging // *Radiology*. 1991. Vol. 178. P. 467—474.
16. 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.
17. Luoma E. K., Raininko R., Nummi P. J. et al. Suitability of cerebrospinal fluid as a signal-intensity reference on MRI: evaluation of signal-intensity variations in the lumbosacral dural sac // *Neuroradiology*. 1997. Vol. 39, № 10. P. 728—732.
18. Shafaie F. F., Wippold F. J., Gado M. et al. Comparison of computed tomography myelography and magnetic resonance imaging in the evaluation of cervical spondylotic myelopathy and radiculopathy // *Spine*. 1999. Vol. 24, № 17. P. 1781—1785.
19. Saint-Louis L. A. Lumbar spinal stenosis assessment with computed tomography, magnetic resonance imaging, and myelography // *Clin. Orthop.* 2001. Vol. 384. P. 122—136.
20. Yoshihara M., Tsunoda A., Sato K. et al. Differential diagnosis of NPH and brain atrophy assessed by measurement of intracranial and ventricular CSF volume with 3D FASE MRI // *Acta Neurochir. Suppl.* (Wien). 1998. Vol. 71. P. 371—374.
21. *Магнитный резонанс в медицине: Пер. с англ. / Под ред. П. А. Ринка*. Oxford, 1993.
22. Арутюнов Н. В., Корниенко В. Н., Петрайкин А. В., Белогрудь Т. В. Изучение ликворотока в водопроводе мозга методом фазоконтрастной ангиографии магнитно-резонансной томографии с кардиосинхронизацией (в норме, при нейрохирургических заболеваниях, фантомные исследования) // *Современные проблемы ядерной медицины и радиофармацевтики: Тез. докл. Обнинск*, 2000.
23. Bhadelia R. A., Bogdan A. R., Wolpert S. M. Analysis of cerebrospinal fluid flow waveforms with gated phase-contrast MR velocity measurements // *AJNR*. 1995. Vol. 16. P. 389—400.
24. Gideon P., Thomsen C., Stahlberg F., Henriksen O. Cerebrospinal fluid production and dynamics in normal aging: a MRI phase-mapping study // *Acta Neurol. Scand.* 1994. Vol. 89, № 5. P. 362—366.
25. Enzmann D. R., Pelc N. J. Cerebrospinal fluid flow measured by phase-contrast cine MR // *Am. J. Neuroradiol.* 1993. Vol. 14. P. 1301—1307.
26. Greitz D. CSF-flow at the craniocervical junction // 5-th Advanced course of the ESNR. 1995. P. 19—22.
27. Quigley M. F., Iskandar B., Quigley M. A. et al. 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.
28. Baledent O., Henry-Feugeas M. C., Idy-Peretti I. Cerebrospinal fluid dynamics and relation with blood flow: a magnetic resonance study with semiautomated cerebrospinal fluid segmentation // *Invest. Radiol.* 2001. Vol. 36, № 7. P. 368—377.
29. Freund M., Adwan M., Kooijman H. et al. Measurement of CSF flow in the spinal canal using MRI with an optimized MRI protocol: experimental and clinical studies // *Rofo*. 2001. Vol. 173, № 4. P. 306—314.
30. Hofmann E., Warmuth-Metz M., Bendszus M., Solymsi L. Phase-contrast MR imaging of the cervical CSF and spinal cord: volumetric motion analysis in patients with Chiari I malformation // *AJNR*. 2000. Vol. 21. P. 151—158.
31. Armonda R. A., Citrin C. M., Foley K. T., Ellenbogen R. G. Quantitative cine-mode magnetic resonance imaging of Chiari I malformations: an analysis of cerebrospinal fluid dynamics // *Neurosurgery*. 1994. Vol. 35, № 2. P. 214—224.
32. Haughton V. M., Korosec F. R., Medow J. E. et al. Peak Systolic and Diastolic CSF Velocity in the Foramen Magnum in Adult Patients with Chiari I Malformations and in Normal Control Participants // *AJNR*. 2003. Vol. 24. P. 169—176.
33. Heiss J. D., Patronas N., DeVroom H. L. et al. Elucidating the pathophysiology of syringomyelia // *J. Neurosurg.* 1999. Vol. 91, № 4. P. 553—562.
34. Watabe N., Tominaga T., Shimizu H. et al. Quantitative analysis of cerebrospinal fluid flow in patients

- with cervical spondylosis using cine phase-contrast magnetic resonance imaging // *Neurosurgery*. 1999. Vol. 44, № 4. P. 779—784.
35. Parkkola R. K., Komu M. E., Aarimaa T. M. et al. Cerebrospinal fluid flow in children with normal and dilated ventricles studied by MR imaging // *Acta Radiol*. 2001. Vol. 42, № 1. P. 33—38.
36. Henry-Feugeas M. C., Idy-Peretti I., Baledent O. et al. Cerebrospinal fluid flow waveforms: MR analysis in chronic adult hydrocephalus // *Invest. Radiol*. 2001. Vol. 36, № 3. P. 146—154.
37. Brugières P., Idy-Peretti I., Iffenecker C. et al. CSF Flow Measurement in Syringomyelia // *AJNR*. 2000. Vol. 21. P. 1785—1792.
38. Dujovny M., Fernandez P., Alperin N. et al. Post-cranioplasty cerebrospinal fluid hydrodynamic changes: magnetic resonance imaging quantitative analysis // *Neurol. Res*. 1997. Vol. 19, № 3. P. 311—316.
39. Chu D., Levin D. N., Alperin N. Assessment of the biomechanical state of intracranial tissues by dynamic MRI of cerebrospinal fluid pulsations: a phantom study // *Magn. Reson. Imaging*. 1998. Vol. 16, № 9. P. 1043—1048.
40. Курбатов В. П., Летягин А. Ю. Использование 3D-МР-ангиографии и 3D-МР-миелографии в практике // *Магнитный резонанс в медицине: Тез. докл. междунар. конф. Казань, 1997*. С. 49.
41. Fanucci E., Sergiacomi G., Pocek M. et al. The use of the single-pulse RARE sequence in the study of the cerebrospinal axis // *Radiol. Med (Torino)*. 1992. Vol. 84. P. 544—548.

Применение низкоинтенсивного лазерного излучения при лечении ишемической болезни сердца

К. В. Попов

Новосибирская государственная медицинская академия

Первое сообщение об успешном применении низкоинтенсивного лазерного излучения для лечения больных с ишемической болезнью сердца (ИБС) было опубликовано Н. Н. Шастиным и соавт. в 1979 году [1]. Лазеротерапии (ЛТ) были подвергнуты больные стабильной стенокардией напряжения, а методика заключалась в облучении рефлексогенных зон на грудной клетке (область грудины, верхушки сердца, воротниковая зона и др.) расфокусированным лучом гелий-неонового лазера с экспозицией 30 сек на зону. Эффективность лечения зависела от тяжести заболевания: если у больных стенокардией напряжения I—II функционального класса (ФК) она составила 81,8—90 %, то в группе больных стенокардией IV ФК положительный эффект наблюдался лишь в 47 % случаев. Продолжительность ремиссии у больных стенокардией I—III ФК составила 6—16 месяцев [2]. Из сопутствующих эффектов отмечались кратковременные головокружения, чувство расслабления, измене-

ние локализации и иррадиации болей [1], седативный, мочегонный эффекты [2]. С первых наблюдений было отмечено наличие своеобразного «феномена обострения» — временного ухудшения состояния, учащение приступов стенокардии в период с 6-го по 10-й сеанс облучения [3], в связи с чем нестабильная стенокардия, а тем более острый инфаркт миокарда (ОИМ), являлись противопоказанием к применению ЛТ. Экспериментальное обоснование наружной методики ЛТ было дано при аналогичном облучении животных [4, 5]. Облучение лазерным светом кожи в области верхушки сердца приводило к достоверному расширению артериол, венул и капилляров, увеличению калибра лимфатических сосудов не только в коже и подкожной клетчатке в зоне облучения, но также в миокарде, эпикарде, брыжейке тонкой кишки. Системность воздействия на микроциркуляторные процессы была подтверждена и в клинических работах: по данным конъюнктивальной биомикроскопии наблюдалось ускорение