



# В водовороте жизни

**МРТ-визуализация  
мозга и жидких  
сред организма**

© А. А. Тулупов, А. А. Савелов, О. Б. Богомякова,  
Ю. А. Станкевич, Л. М. Василькив, 2023

В наши дни одно из первых мест среди причин смертности и наступления инвалидизации населения занимают врожденные и приобретенные патологии головного мозга: от инсультов и онкологических заболеваний до травм и нервно-психических расстройств. Неудивительно, что поддержание здоровья мозга является одной из центральных проблем современной медицины. Поэтому такое важное место отводится развитию методов прогнозирования, ранней диагностики и мониторинга эффективности лечения нейропатологий различного происхождения. Среди современных технологий прижизненного неинвазивного изучения состояния центральной нервной системы лидируют методы лучевой диагностики, при этом пальма первенства принадлежит магнитно-резонансной томографии, которая предлагает наиболее широкий спектр подходов к визуализации мозговых тканей и структур

**Ключевые слова:** неврология, магнитно-резонансная томография, ликвородинамика.

**Key words:** neurology, magnetic resonance imaging, cerebrospinal fluid flow

Информация об авторах:  
сотрудники лаборатории МРТ-технологий Международного томографического центра СО РАН (Новосибирск):  
заведующий, советник директора по медицинским исследованиям, д-р мед. наук, проф. РАН, чл.-корр. РАН Андрей Александрович ТУЛУПОВ;  
старший научный сотрудник, канд. физ.-мат. наук Андрей Александрович САВЕЛОВ;  
научный сотрудник, канд. мед. наук Ольга Борисовна БОГОМЯКОВА;  
старший научный сотрудник, канд. мед. наук Юлия Александровна СТАНКЕВИЧ;  
старший научный сотрудник, канд. мед. наук Любовь Михайловна ВАСИЛЬКИВ

Головной мозг – одна из наиболее хорошо снабжаемых кровью областей человеческого тела. Адекватное функционирование всех отделов высшей нервной системы и сопутствующих структур обеспечивает достаточный приток артериальной крови и отток венозной, а также постоянная циркуляция спинномозговой жидкости (ликвора). Нарушение скорости, давления, вязкости и других параметров этих биологических жидкостей может вызвать тяжелую патологию со смертельным исходом. При этом большинство работ в этой области посвящено изучению артериального звена мозговой гемодинамики, а исследования роли венозной и ликворной систем единичны. И хотя опыт последних лет существенно расширил наши знания о ликвородинамике, до сих пор есть много нерешенных и спорных вопросов.

На основе имеющихся на сегодня сведений мы не можем создать целостную картину, описывающую нарушение баланса между жидкими средами центральной нервной системы при различных патологиях. Одна из причин – недостатки существующих инструментальных методов визуализации, поэтому разработка новых подходов и оригинальных методик чрезвычайно перспективна.

Комплексный подход к морфологической и функциональной оценке мозговой ткани могут предложить современные методы лучевой



## МРТ В ЛИДЕРАХ

В основе патологических процессов в организме человека всегда лежат нарушения движения какой-либо биологической жидкости (крови, лимфы, мочи, желчи, внутрисуставной и др.), основным компонентом которой является вода. В разных органах человека в норме и при патологии существуют разные условия для перемещения таких жидкостей, что отражается на их линейной и объемной скоростях, характере движения, взаимодействии со стенками проводящих систем и других динамических параметрах.

Диагностическая визуализация и количественная оценка скоростных характеристик перемещения этих субстратов считаются основой клинической диагностики во многих медицинских отраслях: кардиологии, неврологии и нейрохирургии, урологии, гастроэнтерологии и др., однако технологии прижизненной визуализации движения биожидкостей в организме человека были изобретены и внедрены в клиническую практику лишь в последние 60–70 лет.

В этом отношении МРТ является уникальной, так как именно атомы водорода молекул воды и органических соединений дают «основу» МРТ-сигнала. Остальные методы позволяют оценить перемещение жидкости в организме только опосредованно, по перемещению различных меток (радиоактивных изотопов, красителей и др.), которые нельзя назвать полностью безопасными. Кроме того, введение таких инородных веществ в достаточно хрупкую систему, которой является любая биожидкость, может приводить к неконтролируемому изменению параметров ее движения

диагностики: *магнитно-резонансная томография (МРТ), мультиспиральная компьютерная томография (МСКТ) и ультразвуковое исследование (УЗИ)*. Однако на сегодня лишь МРТ позволяет неинвазивно и даже без использования контрастных средств визуализировать поток жидкости и оценить его количественные параметры. Модификации этого метода (*МР-ангиография, МР-венография, МР-миелография*) позволяют получить большой объем дополнительной информации для оценки функциональных параметров потока биологических жидкостей, что открывает возможности ранней диагностики широкого спектра заболеваний.

## Когда мозгу не хватает крови

Актуальный вопрос современной медицинской диагностики с учетом широкой распространенности острых и хронических нарушений мозгового кровообращения – оценка сосудов и кровотока в головном мозге. Магистральные кровеносные сосуды, снабжающие головной мозг, – *внутренние сонные и позвоночные артерии*. Изменения именно в их бассейнах наиболее часто приводят к сосудисто-мозговым катастрофам.

Современные методики МРТ позволяют в рамках одного обследования качественно и количественно оценить магистральный и тканевой кровотоки, включая расположение и просвет магистральных артерий, параметры потока крови, характеристики соответствующего бассейна кровоснабжения, а также признаки нарушения мозгового кровообращения.

Так, для оценки выраженности гемодинамических нарушений при различных врожденных и приобретенных пороках сердца, крупных артериальных сосудов и их ветвей в мире широко используется двумерная *фазово-контрастная МР-ангиография (2D PCA)*, которая позволяет визуализировать течение и картировать скорость движения крови в плоскости «*томографического среза*» (Stalder *et al.*, 2008; Hsieh *et al.*, 2015).

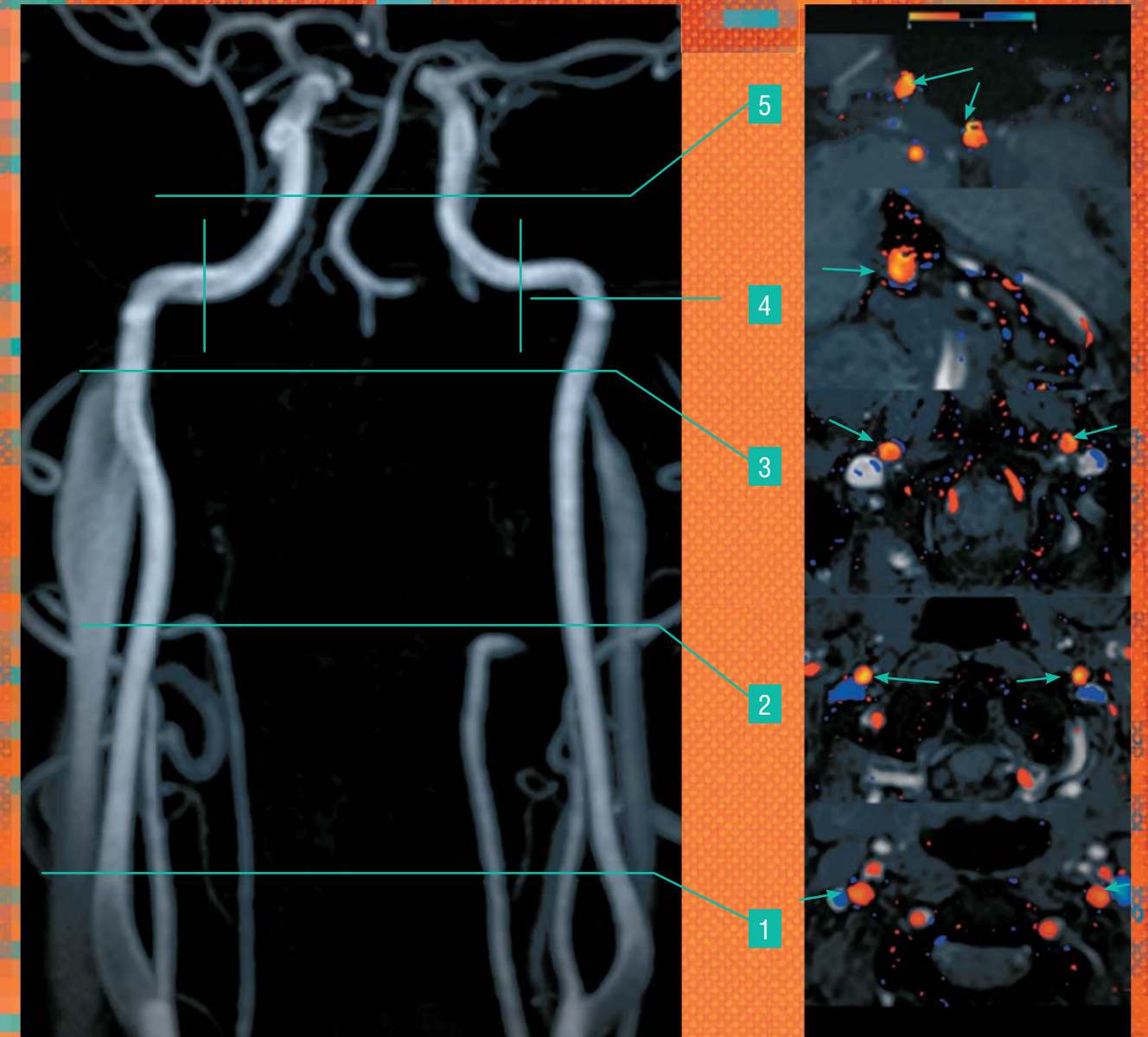
*Контрастная перфузионная МРТ* позволяет оценивать тканевой кровоток на капиллярном уровне. Чаще всего в клинической практике используется метод *динамической восприимчивости контраста (DSC)*, при котором внутривенно вводится агент, содержащий редкоземельный элемент *гадолиний*, широко применяемый в медицине как парамагнитное контрастное вещество (Federau *et al.*, 2012).

Оба этих метода использовали новосибирские специалисты для изучения особенностей магистрального и тканевого кровотока при различной сосудистой патологии головного мозга. В исследовании участвовали как здоровые добровольцы, так и пациенты с патологией позвоночных и внутренних сонных артерий, признаками нарушения мозгового кровообращения, а также после острого инсульта в бассейне средней мозговой артерии.

С использованием рутинного протокола обследования оценен ход магистральных артерий, наличие и выраженность патологических очагов. Дополнительно всем обследуемым проведена 2D PCA, а части из них – еще и перфузионная МРТ.

В результате с помощью 2D PCA удалось визуализировать кровотоки в поперечном сечении в разных сегментах позвоночных, внутренних сонных и средних мозговых артерий. В итоге выявлена неравномерность распределения потока крови в просвете сосуда, включая боковое смещение более быстрой центральной части. Этот эффект был наиболее выражен в участках артерии, расположенных после ее изгиба, как физиологического, так и патологического.

Кроме того, оказалось, что снижение *объемной скорости кровотока* (количества крови, протекающей через поперечное сечение сосуда за 1 мин) тесно



С помощью двумерной фазово-контрастной МР-ангиографии (2D PCA) можно оценить количественные характеристики магистрального кровотока на нескольких уровнях в просвете мозговых артерий.

*Вверху* – визуализация неравномерности распределения скоростных характеристик в просвете разных сегментов внутренних сонных артерий – парных крупных артерий шеи и головы, по данным 2D PCA. Срезы устанавливались перпендикулярно ходу артерий на шейном уровне, с одновременным захватом правого и левого сосуда. В специальной программе полученные томограммы обрабатывались с созданием геометрической фигуры, отграничивающей так называемую область интереса (в данном случае – просвет артерии), внутри которой определялись значения объемной, пиковой и средней скоростей кровотока, а также площадь поперечного сечения сосуда в каждую из фаз цикла сердечной деятельности.

*Цифрами отмечены уровни визуализации кровотока во внутренних сонных артериях, стрелками – просветы артерий на разных уровнях*

связано со степенью выраженности патологических очагов головного мозга. Эта взаимосвязь подтверждена данными перфузионной МРТ: в случае единичных и множественных очагов сосудистых поражений головного мозга скорость магистрального кровотока довольно тесно коррелировала со скоростью кровотока в капиллярах мозговой ткани.

Эти результаты свидетельствуют, что количественная фазово-контрастная МРТ может с успехом применяться для оценки магистрального кровотока при нарушениях мозгового кровообращения, в первую очередь на стадии функциональных изменений, например при грозных предвестниках ишемического инсульта – *транзиторных ишемических атаках*, острых, коротких преходящих эпизодах неврологических нарушений. Однако для широкого использования подобных критериев требуются дополнительные исследования с увеличением числа наблюдений, чтобы учесть такие факторы, как пол, возраст, артериальное давление и др.

## И стакан ликвора

В отличие от крови, о ликворе – спинномозговой жидкости, постоянно циркулирующей в полостях желудочков головного мозга, *субарахноидальном пространстве* (полости между мягкой и паутинной мозговыми оболочками) и ликворопроводящих путях головного и спинного мозга, знают далеко не все. В теле взрослого человека содержится в среднем 4–5 л крови и только около 120–150 мл ликвора, который обновляется несколько раз в сутки.

По химическому составу ликвор сходен с сывороткой крови: до 90% составляет вода, остальное – неорганические (электролиты, неорганический фосфор, микроэлементы) и органические (аминокислоты, белки, углеводы, мочевины и др.) вещества, участвующие в метаболизме мозга.

Процесс ликворобращения (по аналогии с кровообращением) включает три основных звена: продукцию (образование) спинномозговой жидкости, циркуляцию (перемещение) и отток (всасывание). Изменения в ликворной системе сопровождаются многими неврологическими и нейрохирургическими заболеваниями. Такие патологии, как *гидроцефалия* (расширение желудочков головного мозга), опухоли головного и спинного мозга, субарахноидальные кисты, часто приводят к дисбалансу между продукцией, циркуляцией и всасыванием ликвора.

При этом до сих пор существуют трудности в диагностике подобных изменений, а имеющиеся методики не всегда позволяют правильно оценить морфологию ликворосодержащих структур либо обладают побочными эффектами, ограничивающими их применение. Тем не менее современные методы лучевой диагностики позволяют неизменно, с минимальной лучевой нагрузкой

или даже вообще без нее оценить ликворные пространства и полости.

Так, метод *компьютерной томографии*, основанный на использовании рентгеновских фотонов для получения изображения с помощью цифровой реконструкции, позволяет оценить изменения ликвородинамики, сопутствующие травматическим повреждениям. Но он обеспечивает лишь достаточно приблизительную оценку ликворосодержащих полостей и используется обычно для первичного диагностического скрининга.

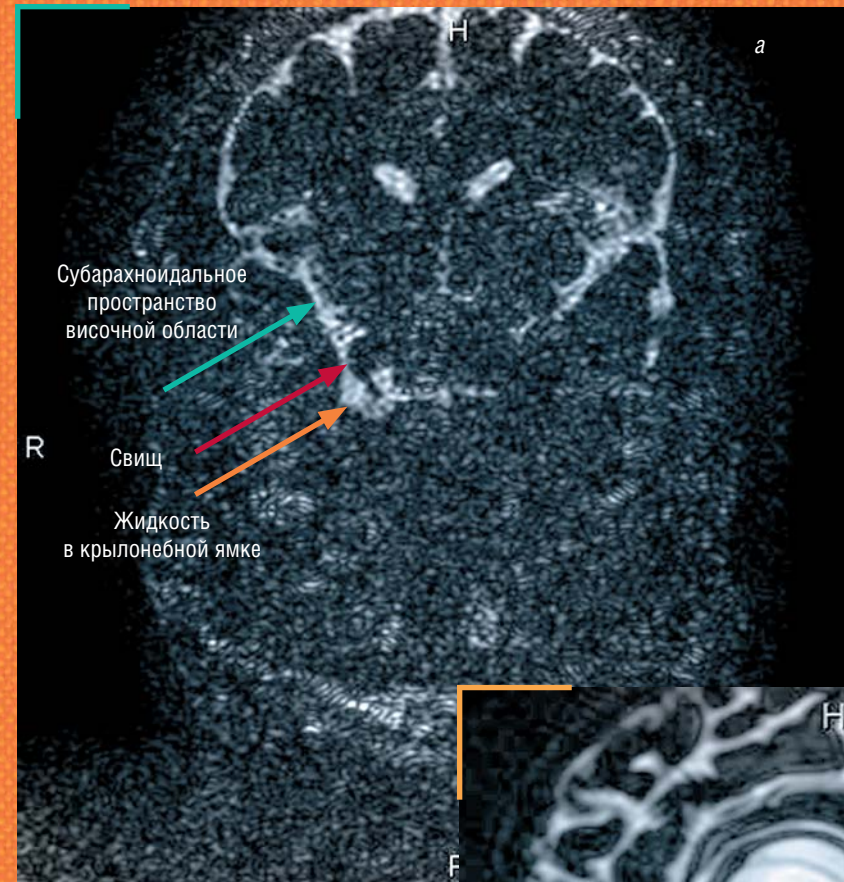
На сегодняшний день наиболее информативным методом визуализации ликворных пространств является метод МРТ и его модификации. Так, по рутинным МРТ-изображениям можно оценить изменение размеров ликворных пространств и быстрый, турбулентный поток ликвора; по статическим изображениям в толстом срезе – визуализировать ликворные пространства и полости; по трехмерным тонкосрезовым снимкам – выявить наличие тонких мембран в субарахноидальных пространствах и цистернах, сужение тонких ликворных структур, наличие атипичных путей оттока ликвора. Оценить проходимость ликворных структур позволяют и динамические МРТ-методики.

В исследованиях новосибирских специалистов хорошо зарекомендовала себя методика *количественной оценки потока (Quantitative Flow)* на основе фазово-контрастной МРТ, с помощью которой можно оценить количественные параметры ликвородинамики на различных уровнях.

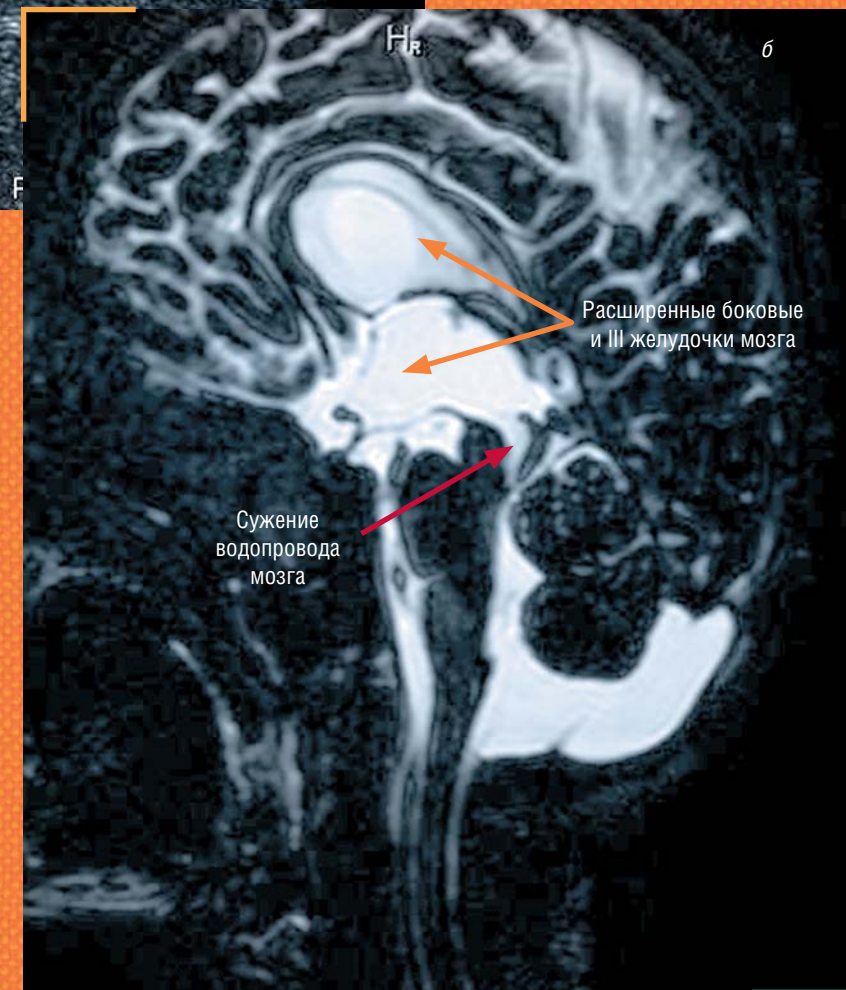
Таким образом у пациентов с гидроцефалией удалось показать увеличение средней и объемной скорости потока спинномозговой жидкости на уровне *водопровода мозга* – участка центрального канала, соединяющего третий и четвертый желудочек мозга, в самом четвертом желудочке и так называемом *отверстии Мажанди* в его нижних отделах. При этом в *базальных цистернах* (расширении в основании мозга) отмечалось прогрессирующее снижение средней и объемной скоростей потока ликвора, которое зависело от степени выраженности гидроцефалии.

Такие изменения динамики спинномозговой жидкости свидетельствуют о нарушении механизмов ее всасывания. А в качестве диагностических критериев стадии декомпенсации у пациентов с гидроцефалией можно использовать значения средней и объемной скоростей потока на уровне базальных цистерн (< 0,40 и 0,50 мл/с соответственно).

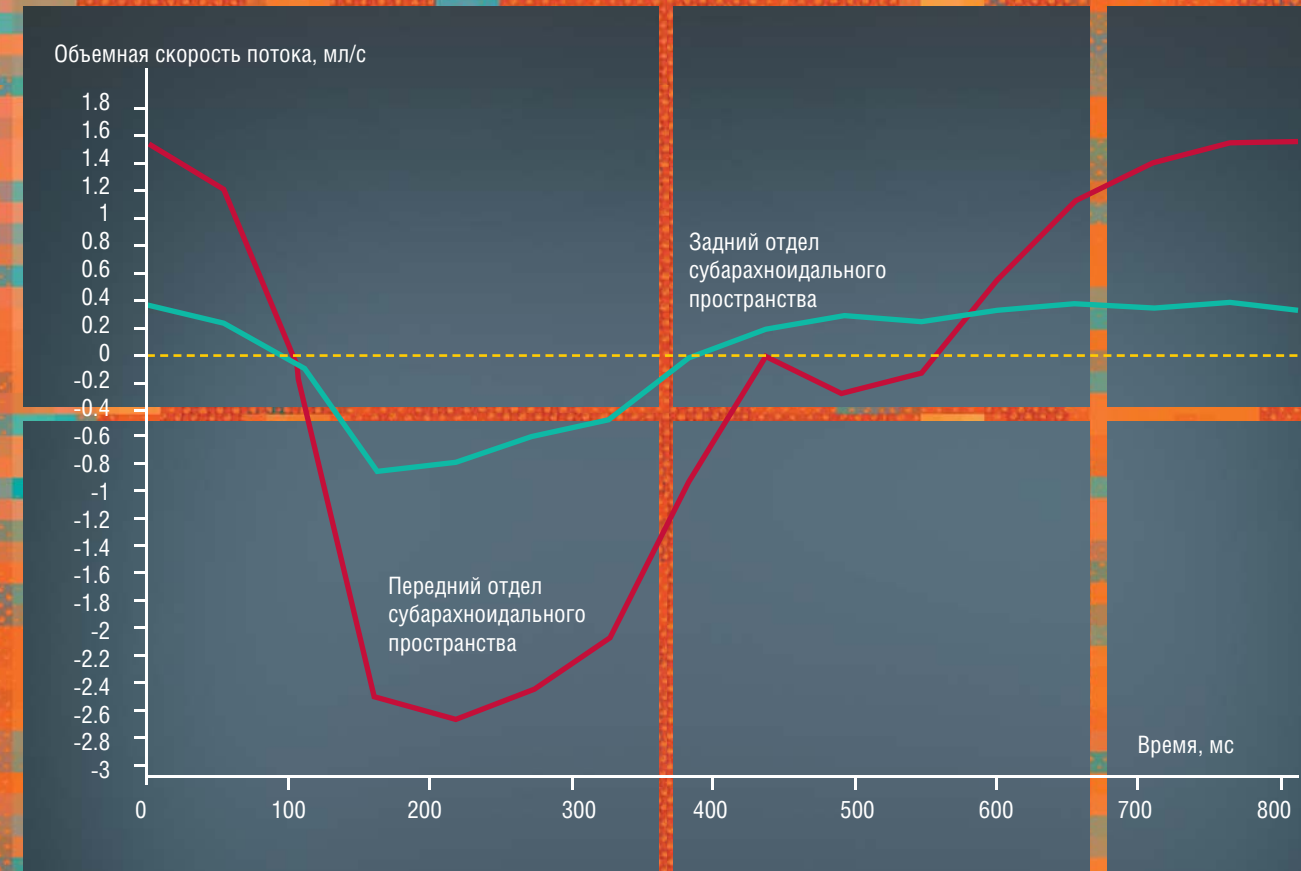
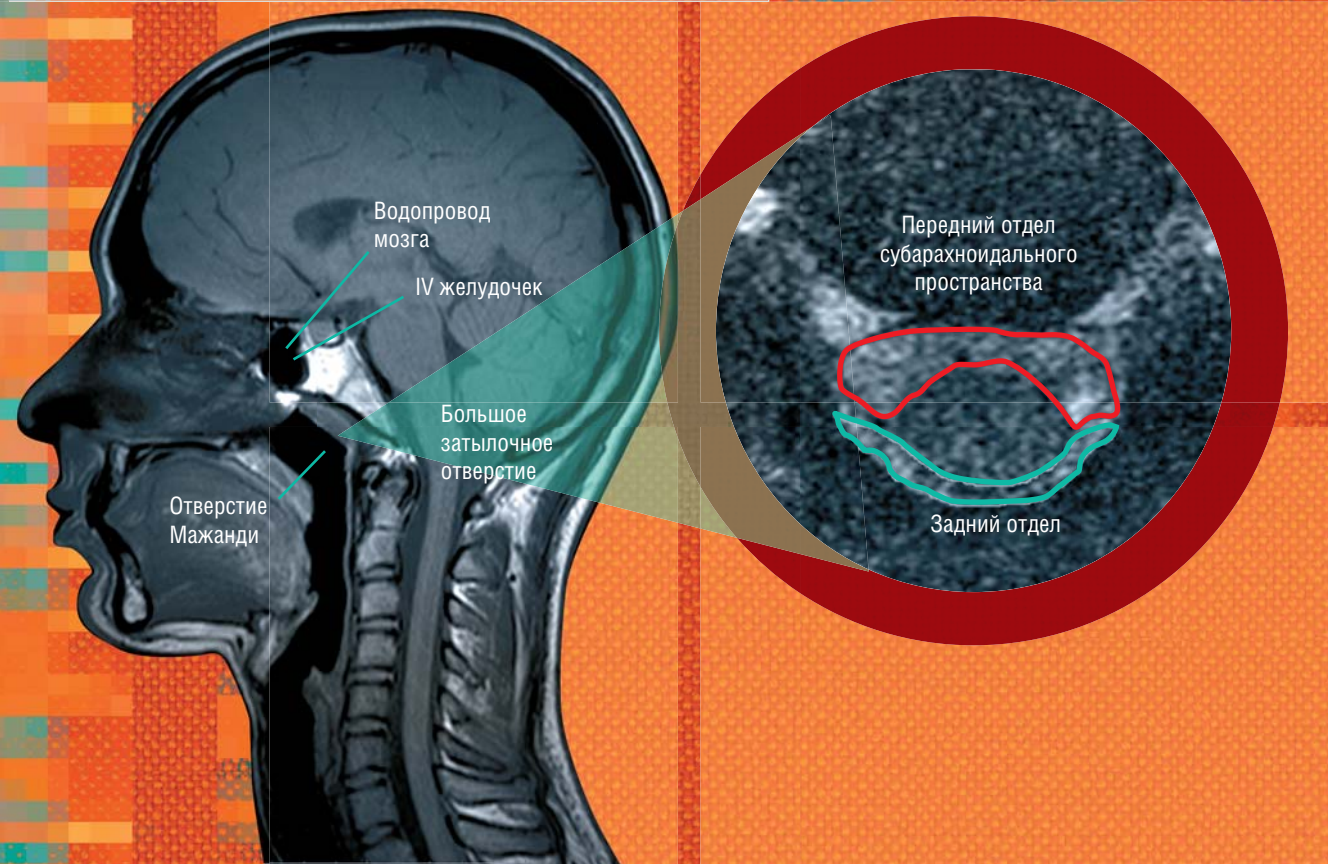
У пациентов с синдромом *внутричерепной гипертензии* об ускоренной эвакуации ликвора из полости черепа свидетельствует увеличение (примерно на треть) скоростей потока спинномозговой жидкости на уровне водопровода мозга, четвертого желудочка и большого затылочного отверстия. Так как у таких больных желудочковая система имеет нормальные размеры, то это



Тонкосрезовые трехмерные МРТ-методики позволяют определить наличие стойких сужений тонких ликворных структур, патологических отверстий-фистул и нетипичных путей оттока спинномозговой жидкости:  
*вверху* – свищ, дефект твердой мозговой оболочки, представляющий патологическое соединение (канал) между ликворным пространством височной области и крылонебной ямкой – щелевидным пространством черепа, в котором в норме ликвора нет. Ямка сообщается с носовой полостью, поэтому в случае свища ликвор начинает вытекать через нос;  
*справа* – выраженное воронковидное сужение дистальных отделов водопровода мозга у ребенка с вентрикуломегалией (увеличением желудочков)



Спинномозговая жидкость (ликвор) осуществляет целый ряд функций: служит механической защитой («гидравлической подушкой») для мозга, поддерживает внутричерепное давление, участвует в регуляции кровообращения в полости черепа и выводе продуктов метаболизма клеток, а также оказывает бактерицидное действие. В сутки сосудистые сплетения боковых желудочков мозга синтезируют около полулитра ликвора, а поскольку объем ликворных полостей намного меньше, то спинномозговая жидкость ежедневно обновляется 4–5 раз



либо повышенное образование ликвора, что встречается редко (например, при опухолевых поражениях сосудистых сплетений), либо его накопление в соединительной ткани и межклеточных пространствах мозга.

В данном случае на скорость перемещения ликвора может влиять много параметров, в том числе состояние артериального русла и скорость распространения по нему *пульсовой волны* повышенного давления, вызванной выбросом крови из левого желудочка сердца. У пациентов с синдромом *внутричерепной гипертензии* пульсовая волна распространяется быстрее, что свидетельствует о повышенной жесткости стенок мелких сосудов, которая может быть следствием накопления жидкости в межклеточных пространствах соединительной ткани.

Своевременная и точная диагностика заболеваний центральной нервной системы представляет важную медицинскую и медико-социальную проблему в связи с ростом заболеваний головного мозга. Достигнутый на сегодня прогресс в изучении причин, механизма и диагностики нейропатологий во многом обязан широкому внедрению новейших методов нейровизуализации на основе метода МРТ. С помощью различных модификаций метода МРТ удалось

раскрыть механизмы динамики крови и спинномозговой жидкости в головном и спинном мозге, изучить структуру и особенности метаболизма в мозговой ткани.

В современной медицинской литературе имеется достаточно много сведений об использовании МРТ в неврологии. Однако лишь недавно были открыты новые возможности МРТ в диагностике мозговых патологий на самых ранних стадиях – на уровне микроциркуляции и первых метаболических изменений. В частности, результаты, полученные новосибирскими исследователями, подтверждают, что современные подходы в МРТ существенно расширяют наши знания о патофизиологии расстройств ликвородинамики, а методики нейровизуализации дают возможность мониторинга этой системы при терапевтическом и оперативном лечении.

К сожалению, большинство этих методов настолько сложны и трудоемки, что их могут применять лишь в специализированных центрах, что не всегда возможно с учетом состояния пациента. Именно поэтому необходимо и дальше совершенствовать лучевую диагностику на основе самых современных возможностей МРТ – это будет неопределимым вкладом в развитие не только дифференциальной диагностики патологий головного мозга, но и неврологии и нейрохирургии в целом.

С помощью МРТ-методики количественной оценки потока (QF) на основе фазово-контрастной МРТ можно провести многоуровневую качественную и количественную оценку параметров потока спинномозговой жидкости. Один из таких уровней – большое затылочное отверстие (слева вверху). Справа – представление этих же результатов МРТ специальной программой, с помощью которой можно отследить пульсирующий характер потока ликвора. На графике показаны изменения объемной скорости потока спинномозговой жидкости за время одного сердечного цикла в переднем и заднем отделах субарахноидального пространства на уровне большого затылочного отверстия

#### Литература

- Богомякова О.Б., Станкевич Ю.А., Колпаков К.И. и др. Расчетные параметры для оценки взаимодействия жидких сред центральной нервной системы по данным лучевой интроскопии (Часть 1) // *Вест. рентгенологии и радиологии*. 2020. Т. 104. № 4. С. 244–252.
- Тулунов А.А., Летягин А.Ю., Курбатов В.П. и др. Возможности магнитно-резонансной томографии в визуализации периферического кровотока // *Вест. НГУ. Серия: Биология, клиническая медицина*. 2004. Т. 2. № 1. С. 57–69.
- Bogomyakova O., Stankevich Yu., Mesropyan N. et al. Evaluation of the flow of cerebrospinal fluid as well as gender and age characteristics in patients with communicating hydrocephalus, using phase-contrast magnetic resonance imaging // *Acta Neurologica Belgica*. 2016. V. 116. N. 4. P. 495–501.
- Federau C., Maeder Ph., O'Brien K. et al. Quantitative measurement of brain perfusion with intravoxel incoherent motion MR imaging // *Radiology*. 2012. V. 265. N. 3. P. 874–81.
- Hsieh K., Stein K., Mono M.-L. et al. In-vivo phase contrast magnetic resonance angiography of the cerebrovascular system: a comparative study with duplex sonography // *Swiss Med. Weekly*. 2015. w14155.
- Stalder A.F., Russe M.F., Frydrychowicz A. et al. Quantitative 2D and 3D phase contrast MRI: Optimized analysis of blood flow and vessel wall parameters // *Magn Reson Med*. 2008. V. 60. N. 5. P. 1218–1231.