



МЕДИЦИНСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

Научная статья.
УДК 616-073.8, 612.824.1
<https://doi.org/10.52560/2713-0118-2022-1-45-62>

Опыт применения методик магнитно-резонансной миелографии у пациентов с неврологической и нейрохирургической патологией

О. Б. Богомякова^{*1}, Л. М. Василькив¹, Ю. А. Станкевич¹,
А. А. Савелов¹, А. А. Тулупов^{1,2}

¹ ФГБУ НИ «Международный томографический центр» Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск

² ФГБУ ВО «Новосибирский национальный исследовательский государственный университет»

Реферат

Цель исследования — изучить возможности клинического применения методик МР-миелографии в статическом и динамическом режимах у пациентов с различной неврологической и нейрохирургической патологией, сопровождающейся расстройствами ликвородинамики. На МР-томографах Philips 1,5 и 3,0 Тл представлен расширенный протокол исследования пациентов с расстройствами ликвородинамики. Протокол включает помимо рутинных последовательностей (T1-, T2-ВИ, FLAIR) методики тонкосрезовой МР-миелографии в статическом режиме (CSF-DRIVE, 3D-MYUR) с подавлением сигнала от мягких тканей, кинометодику МР-миелографии (CSF-PCA) в оптимальной проекции и методику фазового контраста с количественной оценкой потока ликвора на уровне патологии и на смежных уровнях. Проведена оценка диагностической значимости предложенного протокола исследования. Расширенный протокол исследования был применен у пациентов с идиопатической нормотензивной гидроцефалией, обструктивной гидроцефалией, аномалией Киари I типа, у пациентов с сирингомиелией на уровне шейного отдела спинного мозга и показал высокую эффективность в оценке ликвородинамики у пациентов неврологического и нейрохирургического профиля. Применение расширенного подхо-

* **Богомякова Ольга Борисовна**, кандидат медицинских наук, научный сотрудник лаборатории «МРТ ТЕХНОЛОГИИ» ФГБУ НИ «Международный томографический центр» СО РАН, Новосибирск.

Адрес: 630058, г. Новосибирск, ул. Русская, д. 29, кв. 98.
Тел.: +7 (962) 823-61-52. Электронная почта: bogom_o@tomo.nsc.ru
ORCID.org/0000-0002-8880-100X

Bogomyakova Olga Borisovna, Ph. D. Med, researcher assistant of the laboratory «MRI TECHNOLOGIES» The Institute International Tomography Center of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk.

Address: 29-98, Russkaya ul., Novosibirsk, 630058, Russia.
Phone number: +7 (962) 823-61-52. E-mail: bogom_o@tomo.nsc.ru
ORCID.org/0000-0002-8880-100X

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

да позволяет наиболее полно оценить состояние ликворной системы, проходимость ликворных путей (наличие дополнительных перегородок/мембран, частичных/полных стенозов и сужений), а также до- и постоперационные морфофункциональные изменения.

Ключевые слова: магнитно-резонансная томография, миелография, ликвородинамика, гидроцефалия, мальформация Киари.

Финансирование исследования и конфликт интересов

Исследование не финансировалось какими-либо источниками. Авторы заявляют, что данная работа, ее тема, предмет и содержание не затрагивают конкурирующих интересов. Мнения, изложенные в статье, принадлежат авторам рукописи. Авторы подтверждают соответствие своего авторства международным критериям ICMJE (все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией).

MEDICAL TECHNOLOGY

Scientific article.

Experience of Application of Magnetic Resonance Myelography Methods in Patients with Neurological and Neurosurgical Pathology

O. B. Bogomyakova^{*,1}, L. M. Vasilkiv¹, Yu. A. Stankevich¹,
A. A. Savelov¹, A. A. Tulupov^{1,2}

¹ The Institute International Tomography Center of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk

² Novosibirsk State University, Russia

Abstract

Purpose — to study the possibilities of clinical application of MR-myelography techniques in static and dynamic modes in patients with various neurological and neurosurgical pathologies accompanied by CSF dynamics disorders. On the Philips 1.5 and 3.0 T MRI scanners, an extended protocol for examination of patients with cerebrospinal fluid disorders was presented. The protocol includes, in addition to routine sequences (T1-, T2-WI, FLAIR), thin-slice MP-myelography in a static mode (CSF-DRIVE, 3D-MYUR) with soft tissues signal suppression. Also, a cinema-technique of MR myelography (CSF-PCA) in the optimal projection and a phase-contrast method with a quantitative assessment of the cerebrospinal fluid flow at the pathology level and at adjacent levels were performed. The assessment of the diagnostic significance of the proposed research protocol was carried out. The extended study protocol was applied in patients with idiopathic normotensive hydrocephalus, obstructive hydrocephalus, Chiari malformation type I, in patients with syringomyelia at the level of the cervical spinal cord and showed high efficiency in assessing of cerebrospinal fluid dynamics in patients with a neurological and neurosurgical profile. The use of extended approach allows to more fully evaluate the state of the cerebrospinal fluid system, the patency of the cerebrospinal fluid (the presence of additional septa / membranes, partial / complete stenosis and narrowing), as well as pre- and postoperative morfo-functional changes.

Key words: Magnetic Resonance Imaging, Myelography, Cerebrospinal Fluid Dynamics, Hydrocephalus, Chiari Malformation.

Research funding and conflict of interest

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

Актуальность

Различные неврологические и нейрохирургические заболевания могут сопровождаться морфологическими изменениями ликворных путей головного и спинного мозга, которые проявляются различными формами гидроцефалии, арахноидальными кистами головного и спинного мозга, базальными ликвореями и спинальными ликворными фистулами, а также «блокадой» субарахноидальных пространств головного и спинного мозга. Вместе с морфологическими изменениями ликворных путей развиваются и ликвородинамические нарушения (циркуляция и резорбция цереброспинальной жидкости).

Поэтому оценка изменений цереброспинальной жидкости важна для неврологов и нейрохирургов для планирования и оценки оперативного и консервативного лечения.

На сегодняшний день методы лучевой диагностики являются одними из наиболее информативных для верификации диагноза. Магнитно-резонансная томография (МРТ) занимает особое положение среди них, так как имеет ряд преимуществ, главное из которых — оптимальное сочетание безопасности проведения исследования и его информативности [1]. Этот метод является одним из самых перспективных, быстроразвивающихся и наиболее востребованных клиницистами во всем мире. Особые

последовательности при использовании данного метода позволяют подавить сигнал от мягких тканей, оставляя ярким сигнал от жидкости. Особое распространение получили методики бесконтрастной магнитно-резонансной (МР) миелографии и МР-ангиографии. Кроме того, возможно получение тонкосрезовых изображений для исследования ликворной системы, а также количественная оценка потока с применением метода фазоконтрастной магнитно-резонансной томографии [11, 14, 17]. Однако требуется оценка эффективности данных методик и возможности их применения в диагностической практике [2].

Цель: изучить возможности клинического применения методик МР-миелографии в статическом и динамическом режимах у пациентов с различной неврологической и нейрохирургической патологией, сопровождающейся расстройствами ликвородинамики.

Материалы и методы

Все обследования были выполнены на 1,5 Тл МР-томографе Achieva (Philips), 1,5 Тл и 3,0 Тл томографах Ingenia (Philips). Изначально проводилось рутинное обследование, которое включало стандартные последовательности: T1-, T2-ВИ, FLAIR, бесконтрастные МР-миелографию и МР-ангиографию в тол-

стом срезе. Далее в зависимости от выявленной патологии и/или направления врача пациентам выполнялась прицельная оценка ликворной системы и ликвородинамики.

В качестве дополнительных методик применялись: методики тонкосрезовой МР-миелографии в статическом режиме — CSF-DRIVE (cerebrospinal fluid driving equilibrium — управляемое равновесие, восстановление продольной намагниченности импульсом), трехмерная миелография (3D-myelography — 3D-MYUR), кинометодика МР-миелографии (cerebrospinal fluid phase-contrast angiography — CSF-PCA) и методика количественной оценки потока ликвора — фазоконтрастная МРТ (cerebrospinal fluid quantitative flow — CSF-QF).

3D-MYUR и CSF-DRIVE — сильно взвешенные по T2-ВИ времени релаксации последовательности высокого разрешения [13], позволяющие получить яркий сигнал от ликвора на фоне подавления сигнала от мягких тканей и имеющие толщину среза 1–1,5 мм.

Технические характеристики методик представлены в табл. 1.

Методика фазового контраста использует сдвиг по фазе прецессии спинов, который возникает, когда спины перемещаются в присутствии градиента поля [6, 17]. Выполняется одновременно с кардиосинхронизацией по ЭКГ. Используя биполярный градиент, получают дважды фазовые изображения одного и того же среза (с компенсацией движения и без нее). Далее одно выражение вычитается из другого, оставляя сигнал только от движущейся жидкости [17]. При движении протонов с потоком возникают фазовые эффекты, дающие яркий или темный сигнал от потока. Важной является ориентация среза наиболее перпендикулярно току жидкости. Для получения информативного изображения также необходимо указывать порог кодирования скорости Venc (velocity encoding threshold). Оптимальные Venc для исследования ликворотока в головном мозге в норме составляют от 5 до 20 см/с в зависимо-

Таблица 1

Технические характеристики параметров статических тонкосрезовых методик МР-миелографии: 3D-MYUR, CSF-DRIVE

Параметр	3D-MYUR	CSF-DRIVE
TR	1104 мс	1500 мс
TE	662 мс	200 мс
FA	900	900
Матрица	230 × 230	230 × 230
Толщина среза	1,5 мм	1 мм
Количество срезов	100–120	10–20
Количество усреднений	2	1
Длительность исследования	3 мин 21 с	1 мин 09 с
Ориентация среза	Фронтальная с последующей 3D-реконструкцией	Сагиттальная, фронтальная, аксиальная

сти от уровня исследования [3, 6, 14]. Программа постпроцессинга позволяет визуализировать пульсовое движение цереброспинальной жидкости, оценить скоростные параметры потока жидкости в плоскости среза (мгновенные значения скорости в отдельные фазы сердечного цикла и средний поток). Данная методика может быть выполнена в CSF-PCA на различных интракраниальных и экстракраниальных уровнях, однако информативность методики снижается на уровне позвоночного канала грудных и поясничных сегментов. Технические характеристики методики представлены в табл. 2.

С использованием такого подхода (рутинные методики в комплексе с оценкой ликвородинамики) проведен анализ состояния ликворной системы у пациентов с идиопатической сообщающейся гидроцефалией (15 человек),

обструктивной гидроцефалией — состоянии после эндоскопической вентрикулоцистерностомии дна III желудочка (6 человек), аномалией Киари I типа (16 пациентов, 4 из которых после оперативного вмешательства — декомпрессии задней черепной ямки), сирингомиелией на уровне шейного отдела спинного мозга (5 человек). В качестве референсных значений использовались количественные данные группы контроля, полученные в ранее проведенных исследованиях (2016). Процедура привлечения к обследованию была построена строго в соответствии с международными требованиями, которые включают в себя: информированность обследуемого, его согласие на проведение обследования в полном объеме и обеспечение конфиденциальности. Все исследования соответствовали этическим стандартам, разработанным в соответствии

Таблица 2

**Технические характеристики параметров динамических методик
MP-миелографии: CSF-QF и CSF-PCA**

Параметр	CSF-QF	CSF-PCA
TR	12 мс	21 мс
TE	7,2 мс	8,0 мс
FA	150	100
Матрица	256 × 179	256 × 162
Толщина среза	4 мм	10 мм
Количество срезов	1 (slab)	1 (slab)
Количество усреднений	2	2
Длительность исследования	3 мин 02 с	5 мин 25 с
Коэффициент скорости ликворотока	5–15 см/с (в зависимости от исследуемого уровня)	5–7 см/с
Ориентация среза	Наиболее перпендикулярно току ликвора	Сагиттальная или фронтальная

с Хельсинкской декларацией Всемирной медицинской ассоциации «Этические принципы проведения научных медицинских исследований с участием человека» с поправками 2000 г. и «Правилами клинической практики в Российской Федерации», утвержденными Приказом Минздрава РФ от 19.06.2003 № 266. Кроме того, исследования проводились под контролем локального этического комитета ФГБУ НИ «Международный томографический центр» СО РАН.

Результаты и обсуждение

Оптимизирован протокол исследования пациентов с неврологической и нейрохирургической патологией, сопровождающейся расстройствами ликвородинамики.

Тонкосрезовая миелография (CSF-DRIVE, 3D-MYUR) с толщиной среза

1–1,5 мм обладает высокой чувствительностью за счет тонких срезов, подавления сигнала от мягких тканей и высокой контрастности между тканью и жидкостью. Данная методика позволила получить дополнительную информацию о морфологическом состоянии ликворных пространств, выявить их взаимосвязь с придаточными пазухами носа в случае с назальной ликвореей, определить уровень расположения миндалин мозжечка и сообщение ликворных пространств на уровне базальных цистерн и большого затылочного отверстия. Ее применение дополнило диагностическую оценку проходимости ликворных структур (отверстий Мажанди и Монро, IV желудочка, водопровода мозга), в том числе — при сдавлении извне (рис. 1, а, б).

У пациентов с гидроцефалией данные методики позволили определить

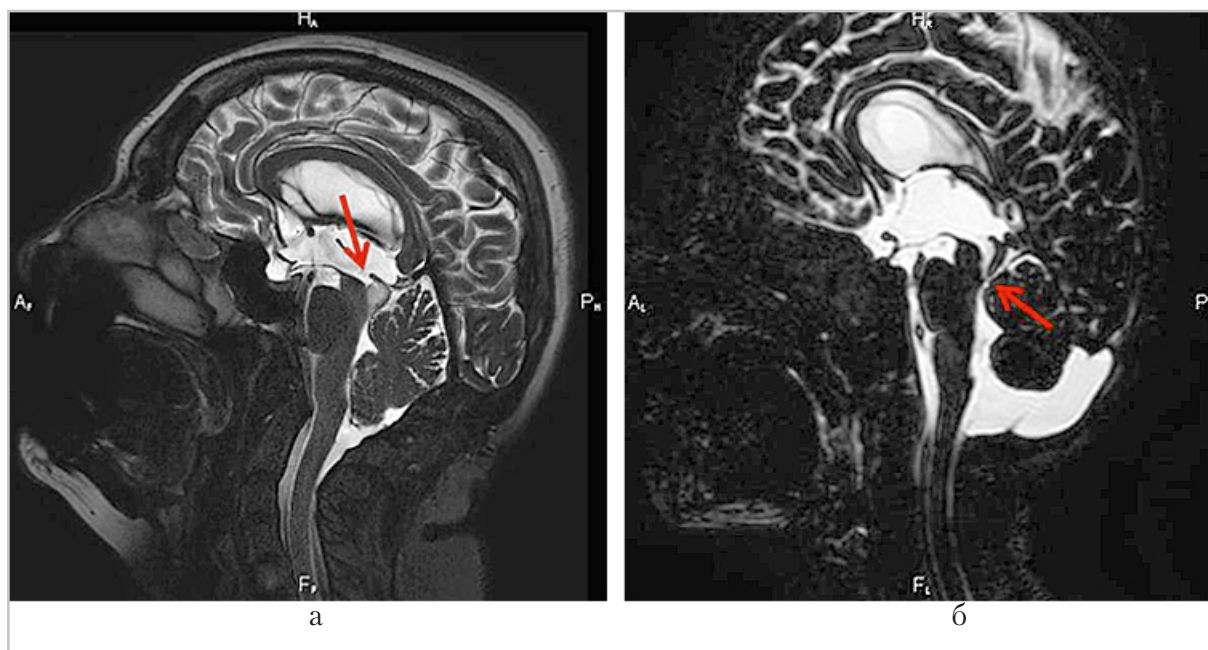


Рис. 1. МР-томограммы. Тонкосрезовая методика CSF-DRIVE в сагиттальной плоскости: а — визуализируется объемное образование пластинки четверохолмия с полным блоком току ликвора на уровне водопровода мозга (стрелка); б — выраженное сужение дистальных отделов водопровода мозга у ребенка с гидроцефалией (стрелка)

наличие/отсутствие и уровень обструкции, поствоспалительные спаечные и/или кистозные изменения субарахноидальных пространств (рис. 2, *а, б*).

В случае перенесенного оперативного вмешательства возможно было проследить стому дна III желудочка и ее размеры (рис. 3, *а, б*).

У пациентов с сирингомиелией на уровне шейного и/или грудного отделов спинного мозга выполнение подобного протокола позволило оценить размеры полости, ее внутренние контуры (для исключения пристеночного солидного компонента и дифференциального диагноза с ассоциированной с опухолью кистой), наличие дополнительных перегородок/перемычек и сообщение с полостью центрального канала (рис. 4, *а, б*).

Методика CSF-PCA в сагиттальной или фронтальной проекции позволила оценить проходимость ликворных путей и состоятельность стомы дна III желудочка в виде пульсирующего потока ликвора на интересующем уровне (рис. 5, *а – г*). На рисунке ниже представлены МР-томограммы пациента 17 лет, перенесшего эндоскопическую вентрикулоцистерностомию дна III желудочка по поводу внутренней хронической тетраветрикулярной прогрессирующей гидроцефалии. На рутинных изображениях отсутствовала отчетливая визуализация стомы (рис. 5, *а*), при этом на специализированных методиках прослеживался сигнал от пульсации ликвора: на тонкосрезовой методике CSF-DRIVE в области стомы определялась

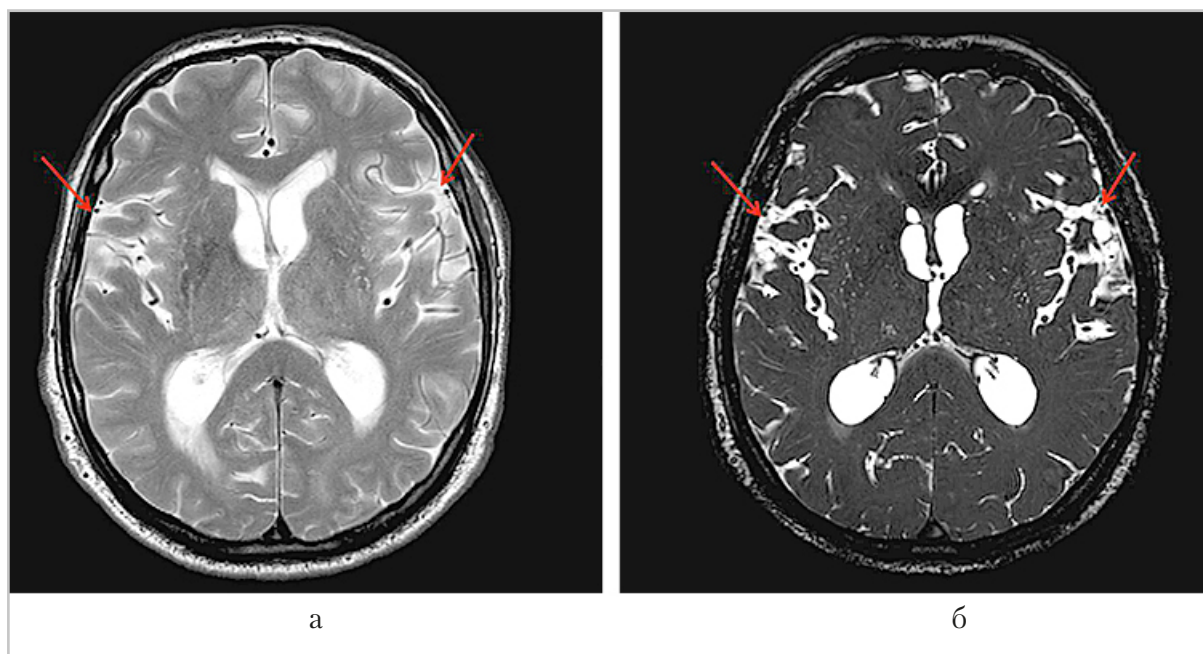


Рис. 2. МР-томограммы пациента 76 лет с прогрессирующей клиникой гипертензионно-гидроцефального синдрома, с перенесенным лептоменингитом в анамнезе: *а* – рутинное T2-ВИ в аксиальной плоскости – расширение боковых желудочков головного мозга, перивентрикулярное повышение интенсивности сигнала в белом веществе, субарахноидальное пространство в области латеральных борозд без значимых изменений (*стрелки*); *б* – тонкосрезовая методика CSF-DRIVE в аксиальной плоскости: визуализируются мелкокистозные и спаечные изменения в области боковых щелей (*стрелки*)

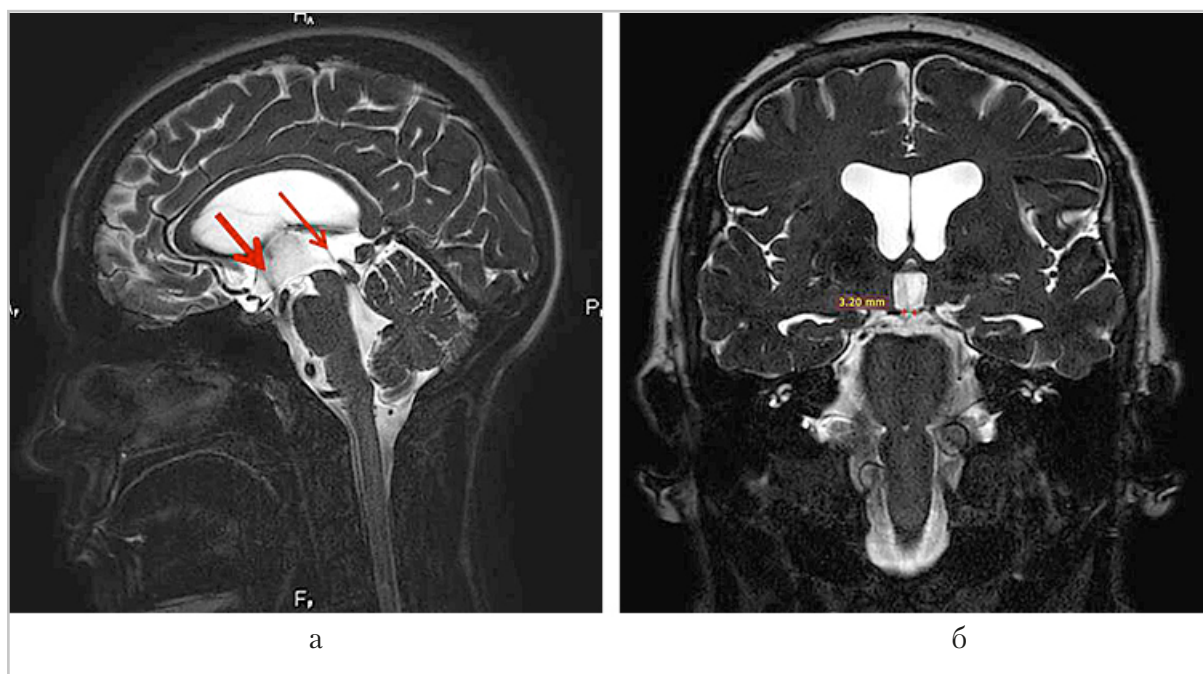


Рис. 3. МР-томограмма. Тонкосрезовая методика CSF-DRIVE: *а* — в сагиттальной плоскости определяется гипердинамическая пульсация ликвора перпендикулярно дну III желудочка в области стомы у пациентки с оперированной гидроцефалией (*толстая стрелка*), симптом потери сигнала от турбулентного потока ликвора на уровне средней трети водопровода мозга (*тонкая стрелка*); *б* — во фронтальной плоскости определяется дефект дна III желудочка

линейная зона снижения интенсивности сигнала — синдром «потери сигнала» за счет гипердинамической пульсации ликвора (рис. 5, *б*), на CSF-PCA в аксиальной и сагиттальной плоскостях, ориентированных по дну III желудочка, в области стомы определялся яркий, гиперинтенсивный сигнал от пульсирующего потока ликвора (рис. 5, *в, г*).

Методика фазоконтрастной МРТ в аксиальном срезе позволила оценить количественные параметры потока ликвора на различных уровнях, уточняя наличие функциональных изменений.

Так, у пациентов с идиопатической сообщающейся гидроцефалией не было выявлено окклюзии ликворных путей, определялось расширение желудочковой системы головного мозга с увели-

чением индекса Эванса до $0,39 \pm 0,05$, отмечалась сглаженность верхушечных борозд в теменной области. Со стороны количественных параметров ликвородинамики отмечалось увеличение значений объемной скорости потока ликвора на уровне водопровода мозга, IV желудочка и отверстия Мажанди: средние значения краниокаудального потока ликвора составили $0,31 \pm 0,10$ мл/с, $0,39 \pm 0,21$ мл/с и $0,38 \pm 0,18$ мл/с соответственно (в норме — $0,11 \pm 0,01$ мл/с, $0,05 \pm 0,02$ мл/с и $0,07 \pm 0,02$ мл/с, $p < 0,01$). Также отмечалось снижение значений объемной скорости потока ликвора на уровне базальных цистерн: на уровне предмостовой цистерны до $0,27 \pm 0,18$ мл/с, мозжечково-мозговой цистерны до $0,52 \pm 0,21$ мл/с (в норме —

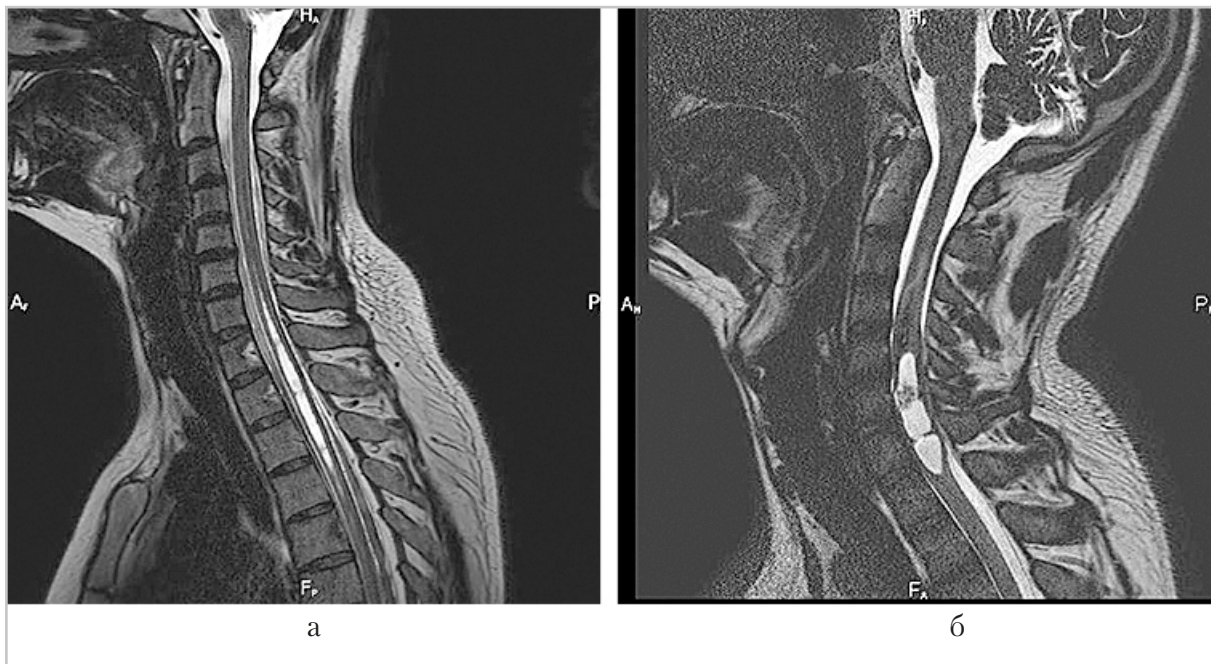


Рис. 4. МР-томограммы. Методика CSF-DRIVE в сагиттальном срезе: *а* — пациентка с сирингомиелической полостью на уровне С7 — Th4 позвонков; *б* — интрадуральное интрамедуллярное образование (эпендимома) в структуре спинного мозга на уровне С6 позвонка, ассоциированное с кистозной полостью (на уровне С5 — Th1 позвонков)

0,52 ± 0,11 мл/с и 0,94 ± 0,12 мл/с соответственно $p < 0,05$).

В данной группе пациентов отмечалось усиление оттока ликвора на уровне водопровода мозга и одновременное уменьшение скоростных параметров на уровне базальных цистерн, что говорит о нарушении внутричерепного соответствия и ухудшении механизмов всасывания ликвора. Подобные изменения согласуются с литературными данными, где в ряде исследований отмечается усиление потока ликвора на уровне водопровода мозга примерно в 10 раз, а также его снижение на шейном уровне примерно в 2 раза [7].

При этом у взрослых больных с открытой и обструктивной формой гидроцефалии длительность пульсации каудального (антеградного) движения ликвора была значительно укорочена

по сравнению с группой контроля. Пиковая диастолическая скорость ликвора, как правило, увеличена, в то время как пиковая систолическая скорость обычно не изменена, вследствие чего результирующий и средний объемный потоки могут быть направлены краниально [4, 10, 18].

У пациентов с обструктивной гидроцефалией и наличием стомы дна III желудочка в случае окклюзии на уровне водопровода мозга или IV желудочка отсутствовала визуализация сигнала от потока ликвора на этих уровнях; в случае стеноза/сдавления водопровода мозга отмечалось снижение объемного потока ликвора с преобладанием ретроградной (каудокраниальной) составляющей до 0,04 мл/с и 0,08 мл/с — антеградный и ретроградный поток (в норме — 0,11 ± 0,01 мл/с и 0,09 ±

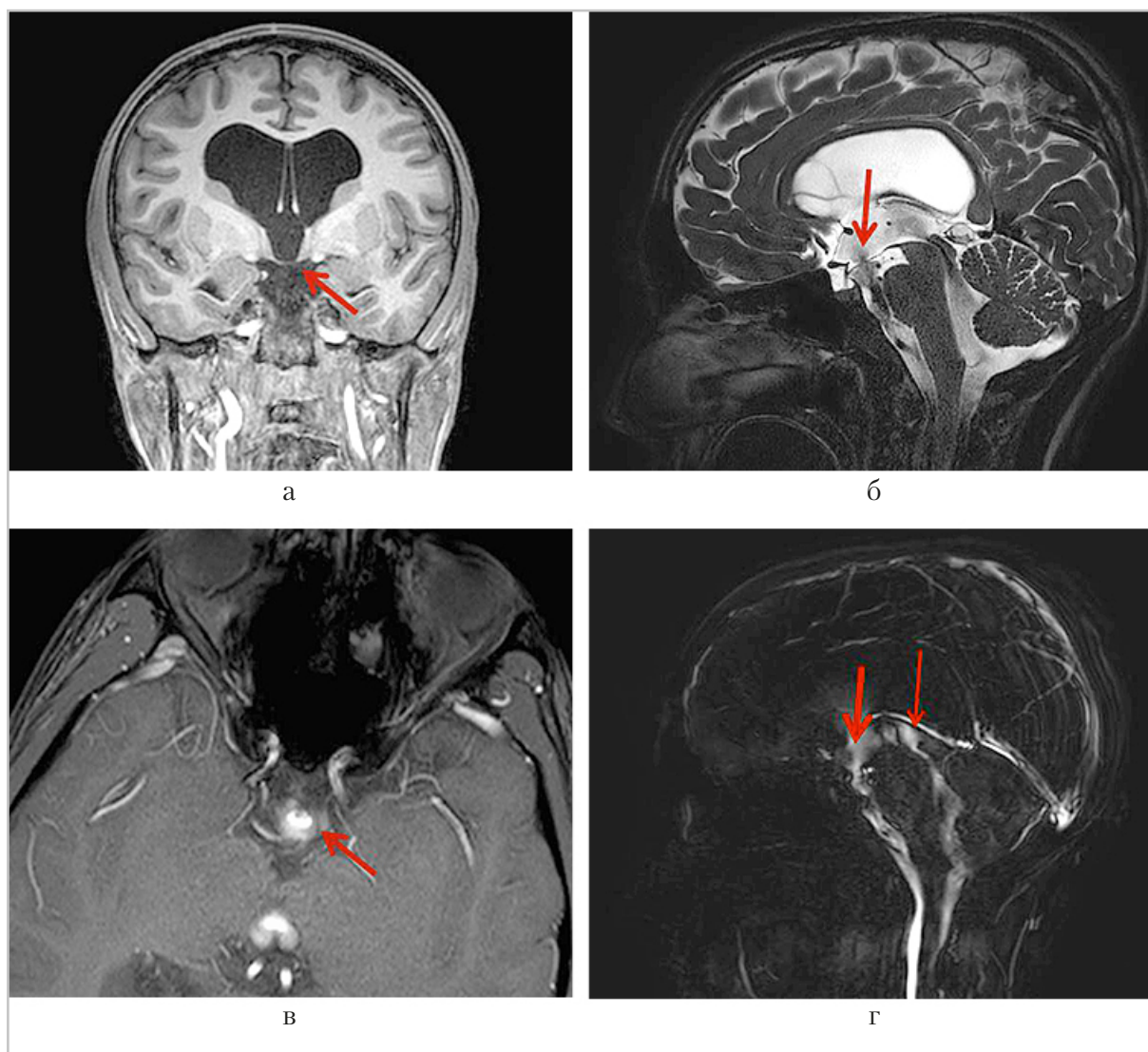


Рис. 5. МР-томограммы пациента, перенесшего эндоскопическую вентрикулоцистерностомию дна III желудочка: *а* — неотчетливая визуализация стомы дна III желудочка на T1-ВИ во фронтальной плоскости (*стрелка*); *б* — методика CSF-DRIVE в сагиттальной плоскости, гипердинамическая пульсация ликвора в области дна III желудочка на уровне стомы (*стрелка*); *в* — динамическая методика CSF-PCA в аксиальной плоскости, яркий сигнал от потока ликвора в области стомы (*стрелка*); *г* — методика CSF-PCA в сагиттальной плоскости, гиперинтенсивный сигнал от потока ликвора в области стомы (*толстая стрелка*) и водопровода мозга (*тонкая стрелка*)

0,01 мл/с соответственно). При этом отчетливо определялась пульсация ликвора на уровне стомы со значительным преобладанием антеградной составляющей объемного потока: в среднем около 0,81 мл/с и 0,54 мл/с (краниокаудальная

и каудокраниальная объемная скорость потока ликвора соответственно), что говорит о состоятельности стомы. Ниже представлены МР-томограммы пациентки 29 лет с образованием пластинки четверохолмия (предположительно га-

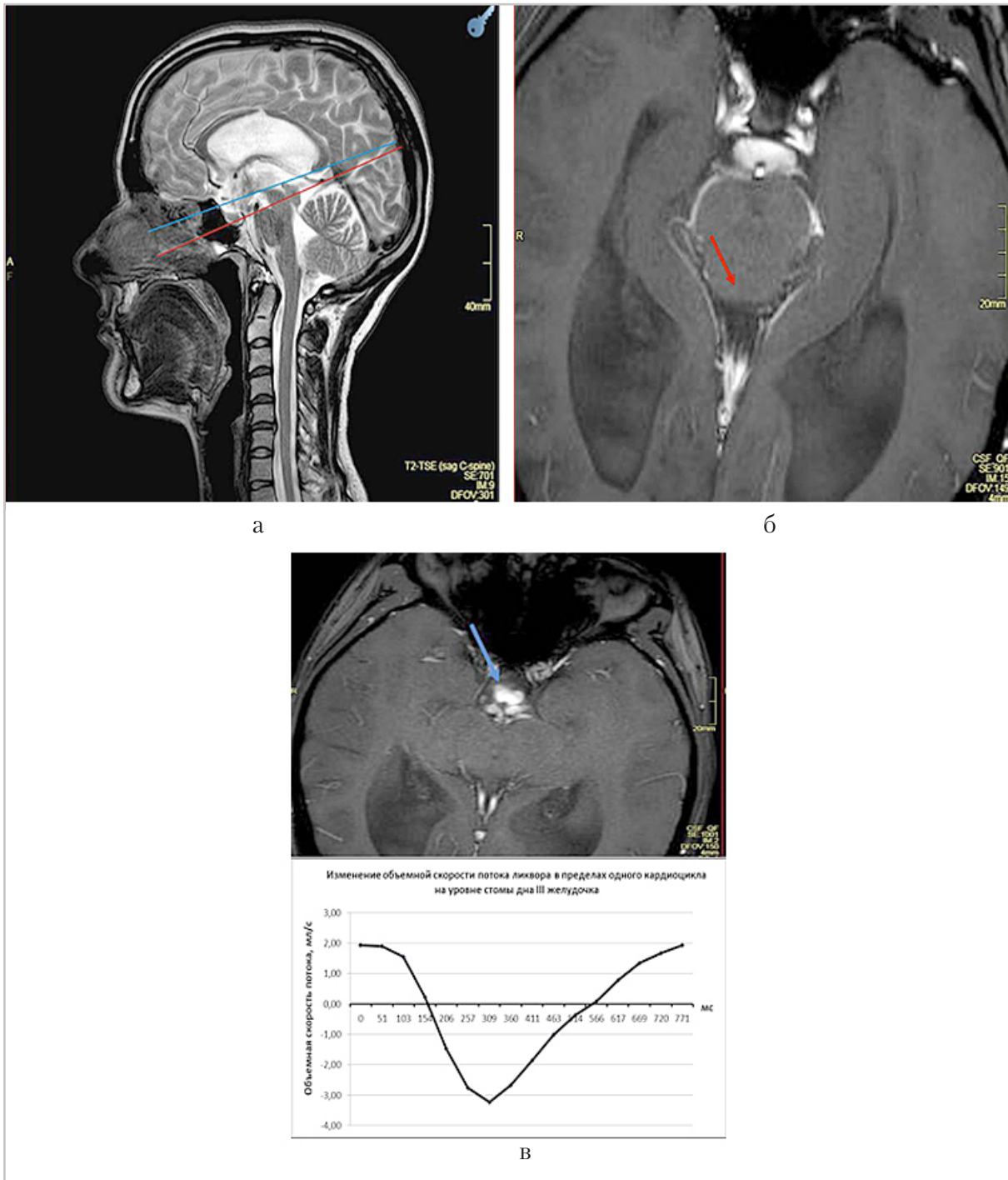


Рис. 6. МР-томография пациентки с образованием пластинки четверохолмия: а – Т2-ВИ в сагиттальной плоскости – утолщение пластинки четверохолмия; б – CSF-QF в аксиальной плоскости – отсутствие сигнала от потока ликвора в области водопровода мозга (стрелка); в – CSF-QF в аксиальной плоскости – в области стомы дна III желудочка визуализируется гиперинтенсивный сигнал от потока ликвора (стрелка), на графике представлен характер изменения объемной скорости потока ликвора на уровне стомы в течение одного сердечного цикла

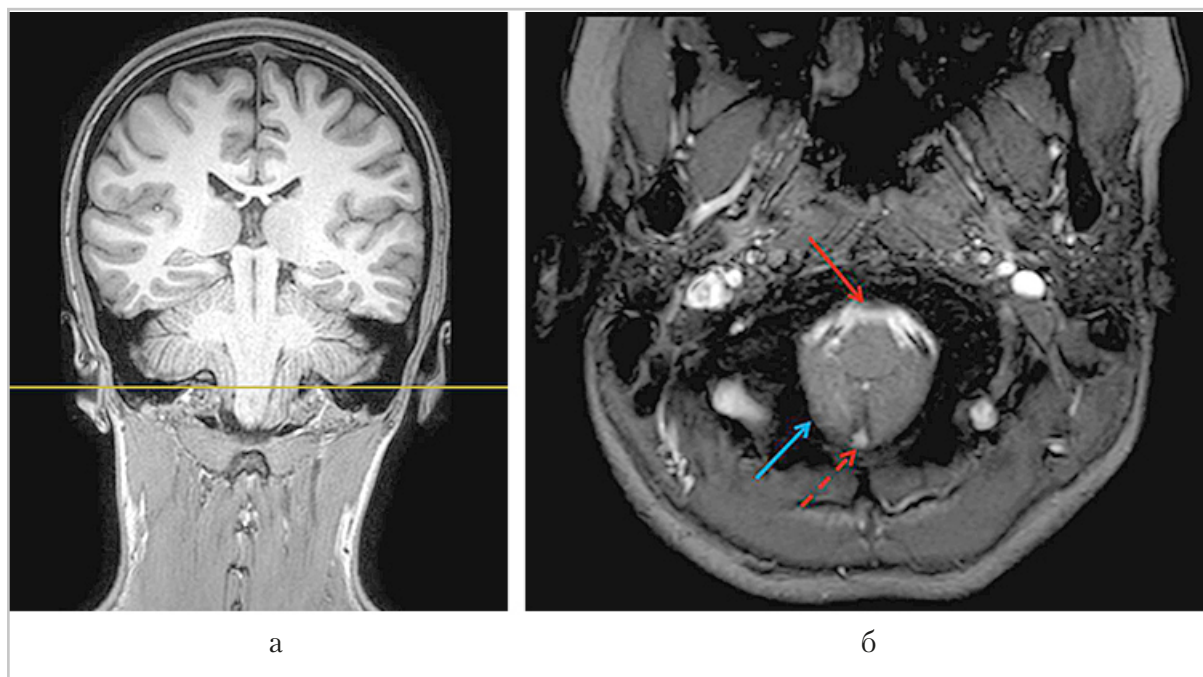


Рис. 7. МР-томограммы пациентки с аномалией Киари I типа: *а* — T1-ВИ во фронтальной плоскости — визуализируется расположение миндалин мозжечка ниже уровня большого затылочного отверстия; *б* — CSF-QF в аксиальной плоскости на уровне большого затылочного отверстия — гиперинтенсивный сигнал от пульсирующего ликвора в переднем компартменте субарахноидального пространства (*красная стрелка*), в заднем компартменте визуализируются миндалины мозжечка (*синяя стрелка*) с небольшим участком пульсирующего ликвора между ними (*красная пунктирная стрелка*)

мартома), перенесшей эндоскопическую вентрикулоцистерностомию дна III желудочка (рис. 6, *а — в*).

На рутинных T2-ВИ определялось утолщение пластинки четверохолмия, вызывающее сдавление водопровода мозга (рис. 6, *а*). На динамических изображениях CSF-QF в аксиальной плоскости (кодирующий коэффициент скорости потока 10 см/с) не дифференцировался сигнал от потока ликвора в области водопровода мозга (рис. 6, *б*), но визуализировался гиперинтенсивный сигнал в области стомы дна III желудочка, при этом преобладала краниокаудальная (антеградная) пульсовая волна объемной скорости потока ликвора (рис. 6, *в*).

У пациентов с аномалией Киари I типа при дооперационном исследовании отмечалось выраженное (субтотальное) снижение скоростных параметров на уровне заднего компартмента субарахноидального пространства большого затылочного отверстия, вплоть до полного отсутствия сигнала от потока: значение объемной скорости потока в среднем составляло $0,001 \pm 0,001$ мл/с (в норме — $0,32 \pm 0,06$ мл/с). Также отмечалось снижение скоростных показателей на смежных уровнях ($p < 0,05$): отверстие Мажанди — до $0,02 \pm 0,01$ мл/с (норма — $0,07 \pm 0,02$ мл/с), субарахноидальное пространство C2–C3 шейного уровня — до $0,82 \pm 0,34$ мл/с (норма — $1,25 \pm 0,18$ мл/с). После декомпресс-

сии задней черепной ямки скоростные параметры потока ликвора увеличивались (с тенденцией к нормализации) на уровне заднего компартмента большого затылочного отверстия (до 0,19–0,28 мл/с), отверстия Мажанди (до 0,05–0,06 мл/с), субарахноидального пространства шейной области (до 0,92–1,05 мл/с). Ниже представлены МР-томограммы пациентки 15 лет с аномалией Киари I типа (рис. 7, а, б).

При проведении фазоконтрастной МРТ определялась пульсация ликвора преимущественно в переднем компартменте субарахноидального пространства, задний компартмент субтотально обтурирован эктопированными миндалинами мозжечка, с небольшим участком, на котором прослеживалась пульсация ликвора.

Согласно литературным данным, у пациентов с мальформацией Киари I отмечено значимое повышение максимального систолического и диастолического движения спинного мозга у пациентов с сирингомиелией и эктопией миндалин, что может служить причиной обструкции большого затылочного отверстия из-за внезапного смещения вниз (каудально) спинного мозга в систолу и снижения сопротивления от цереброспинальной жидкости в диастолу [8, 15]. Кроме того, даже при нормальных или незначительно измененных скоростных показателях у пациентов с аномалией Киари I отмечается увеличение пиков скоростей потока и пространственная неоднородность скоростей, которая уменьшается после проведения декомпрессии задней черепной ямки [5].

Измерение скоростных параметров потока у таких пациентов на до- и послеоперационном этапе может играть важную роль в оценке эффективности про-

веденного лечения, а также в качестве длительного постоперационного мониторинга. Нормализация или увеличение скорости потока на уровне большого затылочного отверстия у таких пациентов может служить важным диагностическим критерием.

У пациентов с сирингомиелией оценка ликвородинамики позволила предположить дальнейший прогноз: наличие активного пульсирующего потока ликвора в просвете полости предполагает высокую вероятность прогрессирования заболевания. Так, измерения, проведенные на шейном, грудном и поясничном уровнях у пациентов с посттравматической сирингомиелией, показали увеличение скорости потока ликвора при стенозе позвоночного канала. Результаты свидетельствовали о том, что характер движения ликвора при посттравматических поражениях спинного мозга может изменить тактику терапевтического лечения [12]. Измерения скорости движения ликвора в сирингомиелитической полости чаще характеризуются прерывистостью как в систолу, так и в диастолу, однако сами значения скоростей потока минимальны [9, 16]. При усилении пульсаций и ускорениях потока высока вероятность прогрессирования заболевания.

Заключение

В ходе проведенных исследований было отмечено, что методики магнитно-резонансной миелографии позволяют не только качественно, но и количественно оценивать морфофункциональные характеристики ликворной системы в условиях нормы и при различных расстройствах ликвородинамики, обладают высокой информативностью и помогают расширить диагностические возможности рутинной практики.

Список литературы

1. Анисимов Н. В., Батова С. С., Пирогов Ю. А. Магнитно-резонансная томография: управление контрастом и междисциплинарные приложения / под ред. Ю. А. Пирогова. М.: Физический факультет МГУ имени М. В. Ломоносова, 2013. 244 с.
2. Петрайкин А. В., Сморчкова А. К., Сергунова К. А., Ахмад Е. С., Семенов Д. С., Кудрявцев Н. Д., Блохин И. А., Морозов С. П., Владзимирский А. В., Маер Р. Ю. Применение модифицированной МРТ-последовательности Time-SLIP для визуализации движения ликвора в водопроводе мозга и шейном отделе позвоночного канала // Журнал «Вопросы нейрохирургии» имени Н. Н. Бурденко. 2019. Т. 83. № 6. С. 64–71.
3. Bogomyakova O., Stankevich Y., Mesropyan N., Shraybman L., Tulupov A. 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. No. 4. P. 495–501. DOI: 10.1007/s13760-016-0608-3
4. Bradley W. G. Magnetic Resonance Imaging of Normal Pressure Hydrocephalus. *Seminars in Ultrasound, CT and MRI*. 2016. V. 37. No. 2. P. 120–128. DOI: 10.1053/j.sult.2016.01.005
5. Buell T., Heiss J., Oldfield E. Pathogenesis and Cerebrospinal Fluid Hydrodynamics of the Chiari I Malformation. *Neurosurg Clin N Am*. 2015. No. 26. P. 495–499. DOI: 10.1016/j.nec.2015.06.003
6. Capel C., Baroncini M., Gondry-Jouet C., Bouzerar R., Czosnyka M., Czosnyka Z., Baledent O. Cerebrospinal fluid and cerebral blood flows in idiopathic intracranial hypertension. *Acta Neurochir Suppl*. 2018. V. 126. P. 237–241. DOI: 10.1007/978-3-319-65798-1_48
7. Czosnyka M., Pickard J. D., Keong N. C. H., Czosnyka Z., Price S. J., Pena A. Imaging normal pressure hydrocephalus: theories, techniques, and challenges. *Neurosurg Focus*. 2016. V. 41 (September): E11. DOI: 10.3171/2016.7.FOCUS16194
8. Frick R., Eide P. K. Comparative observational study on the clinical presentation, intracranial volume measurements, and intracranial pressure scores in patients with either Chiari malformation Type I or idiopathic intracranial hypertension. *J. Neurosurg*. 2017. V. 126. P. 1312–1322. DOI: 10.3171/2016.4.JNS152862
9. Honey C. M., Martin K. W., Heran M. K. S. Syringomyelia fluid dynamics and cord motion revealed by serendipitous null point artifacts during Cine MRI. *Am. J. of Neuroradiology*. 2017. V. 38. No. 9. P. 1845–1847. DOI: 10.3174/ajnr.A5328
10. Keong N., Pena A., Price S., Czosnyka M., Czosnyka Z., Pickard J. Imaging normal pressure hydrocephalus: theories, techniques, and challenges. *Neurosurg Focus*. 2016. V. 41. No. 3. E11. DOI: 10.3171/2016.7.FOCUS16194
11. Longatti P. The Liebau phenomenon: a translational approach to new paradigms of CSF circulation and related flow disturbances. *Child's Nervous System*. 2018. V. 34. No. 2. P. 227–233. DOI: 10.1007/s00381-017-3653-1
12. McCluggage S. G., Oakes W. J. The Chiari I malformation: JNSPG 75th Anniversary Invited Review Article. *J. of Neurosurgery: Pediatrics*. 2019. V. 24. No 3. P. 217–226. DOI: 10.3171/2019.5.PEDS18382
13. Mohammad S. A., Osman N. M., Ahmed K. A. The value of CSF flow studies in the management of CSF disorders in children: a pictorial review. *Insights into Imaging*. 2019. V. 10. No. 3. DOI 10.1186/s13244-019-0686-x

14. *Qvarlander S., Ambarki K., Wahlin A., Jacobsson J., Birgander R., Malm J., Eklund A.* Cerebrospinal fluid and blood flow patterns in idiopathic normal pressure hydrocephalus. *Acta Neurol Scand.* 2017. V. 135. No. 5. P. 576–584. DOI: 10.1111/ane.12636
15. *Raybaud C.* MR assessment of pediatric hydrocephalus: a road map. *Childs Nervous System.* 2016. V. 32. No. 1. P. 19–41. DOI: 10.1007/s00381-015-2888-y
16. *Vinje V., Brucker J., Rognes M.E., Mardal K.A., Haughton V.* Fluid dynamics in syringomyelia cavities: Effects of heart rate, CSF velocity, CSF velocity waveform and craniovertebral decompression. *The Neuroradiol. J.* 2018. V. 31. No. 5. DOI: 10.1177/1971400918795482
17. *Yamada S., Tsuchiya K., Bradley W. G., Law M., Winkler M. L., Borzage M. T., Miyazaki M., Kelly E. J., McComb J. G.* Current and emerging MR imaging techniques for the diagnosis and management of CSF flow disorders: a review of phase-contrast and time-spatial labeling inversion pulse. *Am. J. of Neuroradiology.* 2015. V. 36. No. 4. P. 623–630. DOI: 10.3174/ajnr.A4030
18. *Yin L. K., Zheng J. J., Zhao L., Hao X. Z., Zhang X. X., Tian J. Q., Zheng K., Yang Y. M.* Reversed aqueductal cerebrospinal fluid net flow in idiopathic normal pressure hydrocephalus. *Acta Neurol Scand.* 2017. V. 136. No. 5. P. 434–439. DOI: 10.1111/ane.12750
19. *D. S., Kudryavtsev N. D., Blokhin I. A., Morozov S. P., Vladzimirskiy A. V., Maer R. Yu.* Application of a modified Time-SLIP MRI sequence for visualization of cerebrospinal fluid movement in the cerebral aqueduct and cervical spinal canal. *Zhurnal Voprosy Neurokhirurgii Imeni N.N. Burdenko.* 2019. V. 83. No. 6. P. 64–71 (in Russian). DOI: 10.17116/neuro20198306164
20. *Bogomyakova O., Stankevich Y., Mesropyan N., Shraybman L., Tulupov A.* 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. No. 4. P. 495–501. DOI: 10.1007/s13760-016-0608-3
21. *Bradley W. G.* Magnetic Resonance Imaging of Normal Pressure Hydrocephalus. *Seminars in Ultrasound, CT and MRI.* 2016. V. 37. No. 2. P. 120–128. DOI: 10.1053/j.sult.2016.01.005
22. *Buell T., Heiss J., Oldfield E.* Pathogenesis and Cerebrospinal Fluid Hydrodynamics of the Chiari I Malformation. *Neurosurg Clin N Am.* 2015. No. 26. P. 495–499. DOI: 10.1016/j.nec.2015.06.003
23. *Capel C., Baroncini M., Gondry-Jouet C., Bouzerar R., Czosnyka M., Czosnyka Z., Baledent O.* Cerebrospinal fluid and cerebral blood flows in idiopathic intracranial hypertension. *Acta Neurochir Suppl.* 2018. V. 126. P. 237–241. DOI: 10.1007/978-3-319-65798-1_48.
24. *Czosnyka M., Pickard J. D., Keong N. C. H., Czosnyka Z., Price S. J., Pena A.* Imaging normal pressure hydrocephalus: theories, techniques, and challenges. *Neurosurg Focus.* 2016. V. 41 (September): E11. DOI: 10.3171/2016.7.FOCUS16194
25. *Fric R., Eide P. K.* Comparative observational study on the clinical presentation,

References

- intracranial volume measurements, and intracranial pressure scores in patients with either Chiari malformation Type I or idiopathic intracranial hypertension. *J. Neurosurg.* 2017. V. 126. P. 1312–1322. DOI: 10.3171/2016.4.JNS152862
9. Honey C. M., Martin K. W., Heran M. K. S. Syringomyelia fluid dynamics and cord motion revealed by serendipitous null point artifacts during Cine MRI. *Am. J. of Neuroradiology.* 2017. V. 38. No. 9. P. 1845–1847. DOI: 10.3174/ajnr.A5328
 10. Keong N., Pena A., Price S., Czosnyka M., Czosnyka Z., Pickard J. Imaging normal pressure hydrocephalus: theories, techniques, and challenges. *Neurosurg Focus.* 2016. V. 41. No. 3. E11. DOI: 10.3171/2016.7.FOCUS16194
 11. Longatti P. The Liebau phenomenon: a translational approach to new paradigms of CSF circulation and related flow disturbances. *Child's Nervous System.* 2018. V. 34. No. 2. P. 227–233. DOI: 10.1007/s00381-017-3653-1
 12. McClugage S. G., Oakes W. J. The Chiari I malformation: JNSPG 75th Anniversary Invited Review Article. *J. of Neurosurgery: Pediatrics.* 2019. V. 24. No 3. P. 217–226. DOI: 10.3171/2019.5.PEDS18382
 13. Mohammad S. A., Osman N. M., Ahmed K. A. The value of CSF flow studies in the management of CSF disorders in children: a pictorial review. *Insights into Imaging.* 2019. V. 10. No. 3. DOI 10.1186/s13244-019-0686-x
 14. Qvarlander S., Ambarki K., Wahlin A., Jacobsson J., Birgander R., Malm J., Eklund A. Cerebrospinal fluid and blood flow patterns in idiopathic normal pressure hydrocephalus. *Acta Neurol Scand.* 2017. V. 135. No. 5. P. 576–584. DOI: 10.1111/ane.12636
 15. Raybaud C. MR assessment of pediatric hydrocephalus: a road map. *Childs Nervous System.* 2016. V. 32. No. 1. P. 19–41. DOI: 10.1007/s00381-015-2888-y
 16. Vinje V., Brucker J., Rognes M. E., Mardal K. A., Haughton V. Fluid dynamics in syringomyelia cavities: Effects of heart rate, CSF velocity, CSF velocity waveform and craniovertebral decompression. *The Neuroradiol. J.* 2018. V. 31. No. 5. DOI: 10.1177/1971400918795482
 17. Yamada S., Tsuchiya K., Bradley W. G., Law M., Winkler M. L., Borzage M. T., Miyazaki M., Kelly E. J., McComb J. G. Current and emerging MR imaging techniques for the diagnosis and management of CSF flow disorders: a review of phase-contrast and time-spatial labeling inversion pulse. *Am. J. of Neuroradiology.* 2015. V. 36. No. 4. P. 623–630. DOI: 10.3174/ajnr.A4030
 18. Yin L. K., Zheng J. J., Zhao L., Hao X. Z., Zhang X. X., Tian J. Q., Zheng K., Yang Y. M. Reversed aqueductal cerebrospinal fluid net flow in idiopathic normal pressure hydrocephalus. *Acta Neurol Scand.* 2017. V. 136. No. 5. P. 434–439. DOI: 10.1111/ane.12750

Сведения об авторах

Богомякова Ольга Борисовна, кандидат медицинских наук, научный сотрудник лаборатории «МРТ ТЕХНОЛОГИИ» ФГБУ НИ «Международный томографический центр» СО РАН, Новосибирск.

Адрес: 630058, г. Новосибирск, ул. Русская, д. 29, кв. 98.

Тел.: +7 (962) 823-61-52. Электронная почта: bogom_o@tomo.nsc.ru

ORCID.org/0000-0002-8880-100X

Вклад автора: существенный вклад в концепцию и дизайн исследования, получение данных или их анализ и интерпретацию.

Bogomyakova Olga Borisovna, Ph. D. Med., researcher assistant of the laboratory «MRI TECHNOLOGIES» The Institute International Tomography Center of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk.
Address: 29-98, Russkaya ul., Novosibirsk, 630058, Russia.
Phone number: +7 (962) 823-61-52. E-mail: bogom_o@tomo.nsc.ru
ORCID.org/0000-0002-8880-100X
Author's contribution: literature analysis, text writing, significant contribution to the concept and design of the study, data acquisition or analysis and interpretation.

Василькив Любовь Михайловна, кандидат медицинских наук, научный сотрудник лаборатории «МРТ ТЕХНОЛОГИИ» ФГБУ НИ «Международный томографический центр» СО РАН, Новосибирск.
Адрес: 630030, г. Новосибирск, ул. Заречная, д. 8, кв. 221.
Тел.: +7 (913) 799-72-60. Электронная почта: vasilkiv@tomo.nsc.ru
ORCID.org/0000-0003-1838-8130
Вклад автора: участие в сборе материала, одобрение окончательной версии статьи перед ее подачей для публикации.

Vasilkiv Lyubov Mikhailovna, Ph. D. Med., researcher assistant of the laboratory «MRI TECHNOLOGIES» The Institute International Tomography Center of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk.
Address: 8-221, Zarechnaya ul., Novosibirsk, 630030, Russia.
Phone number: +7 (913) 799-72-60. E-mail: vasilkiv@tomo.nsc.ru
ORCID.org/0000-0003-1838-8130
Author's contribution: participation in the collection of material, approval of the final version of the article before submitting it for publication.

Станкевич Юлия Александровна, кандидат медицинских наук, научный сотрудник лаборатории «МРТ ТЕХНОЛОГИИ» ФГБУ НИ «Международный томографический центр» СО РАН, Новосибирск.
Адрес: 630117, г. Новосибирск, ул. Шатурская, д. 2/2, кв. 125.
Тел.: +7 (923) 135-84-77. Электронная почта: stankevich@tomo.nsc.ru
ORCID.org/0000-0002-7959-5160
Вклад автора: участие в обработке материала и обчете статистических показателей, поиск публикаций по теме, одобрение окончательной версии статьи перед ее подачей для публикации.

Stankevich Yuliya Aleksandrovna, Ph. D. Med., researcher assistant of the laboratory «MRI TECHNOLOGIES» The Institute International Tomography Center of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk.
Address: 2/2-125, Shaturskaya ul., Novosibirsk, 630117, Russia.
Phone number: +7 (923) 135-84-77. E-mail: stankevich@tomo.nsc.ru
ORCID.org/0000-0002-7959-5160
Author's contribution: participation in the processing of the material and calculation of statistical indicators, search for publications on the topic, approval of the final version of the article before submitting it for publication.

Савелов Андрей Александрович, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории «МРТ ТЕХНОЛОГИИ» ФГБУ НИ «Международный томографический центр» СО РАН, Новосибирск.
Адрес: 630090, г. Новосибирск, ул. Институтская, 3А.
Тел.: +7 (913) 919-36-28. Электронная почта: as@tomo.nsc.ru
ORCID.org/0000-0002-5332-2607
Вклад автора: анализ литературы, написание текста, одобрение окончательной версии статьи перед ее подачей для публикации.

Savelov Andrei Aleksandrovich, Ph. D. of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher of the laboratory «MRI TECHNOLOGIES» the Institute International Tomography Center of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk.
Address: 3A, Institutskaya ul., Novosibirsk, 630090, Russia.
Phone number: +7 (913) 919-36-28. E-mail: as@tomo.nsc.ru
ORCID.org/0000-0002-5332-2607
Author's contribution: literature analysis, text writing, approval of the final version of the article before submitting it for publication.

Тулупов Андрей Александрович, доктор медицинских наук, профессор РАН, главный научный сотрудник, заведующий лабораторией «МРТ ТЕХНОЛОГИИ» ФГБУ НИ «Международный томографический центр» СО РАН, Новосибирск; заместитель директора Института медицины и психологии В. Зельмана НГУ.



Адрес: 630090, г. Новосибирск, ул. Терешковой, д. 31, кв. 17.
Тел.: +7 (903) 932-39-80. Электронная почта: taa@tomo.nsc.ru
ORCID.org/0000-0002-1277-4113

Вклад автора: создание концепции научного направления, одобрение окончательной версии статьи перед ее подачей для публикации.

Tulupov Andrei Aleksandrovich, Doctor of Medical Sciences, Professor of the Russian Academy of Sciences, Chief Researcher, Head of the laboratory «MRI TECHNOLOGIES» the Institute International Tomography Center of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk; Deputy Director of the Institute of Medicine and Psychology V. Zelman NSU.

Address: 31-17, Tereshkovoi ul., Novosibirsk, 630090, Russia.
Phone number: +7(903) 932-39-80. E-mail: taa@tomo.nsc.ru
ORCID.org/0000-0002-1277-4113

Author's contribution: creation of the concept of the scientific direction, approval of the final version of the article before submitting it for publication.

Дата поступления статьи в редакцию издания: 15.10.2021 г.
Дата одобрения после рецензирования: 28.11.2021 г.
Дата принятия статьи к публикации: 29.11.2021 г.