

УДК 617-7

DOI: 10.35693/2500-1388-2020-5-4-239-244

Комплексная нейровизуализация черепно-мозговой травмы: магнитно-резонансная томография

А.В. Яриков^{1,3,4}, И.А. Лобанов², В.А. Леонов³,А.П. Фраерман³, С.В. Николенко³¹ФБУЗ «Приволжский окружной медицинский центр» ФМБА (Нижний Новгород, Россия)²ООО МЦ «Тонус» (Нижний Новгород, Россия)³ГБУЗ НО «Городская клиническая больница №39» (Нижний Новгород, Россия)⁴ООО УЗ «Областной диагностический центр» (Владимир, Россия)

Аннотация

Черепно-мозговая травма является одним из наиболее частых видов повреждений и занимает первое место среди причин летальности и инвалидизации трудоспособного населения. Одним из путей улучшения качества оказываемой экстренной нейрохирургической помощи лицам с тяжелой черепно-мозговой травмой представляется своевременная экстренная диагностика повреждений головного мозга. Выбор правильного диагностического метода позволяет оценить объем, тяжесть травмы и выбрать правильную тактику лечения.

В работе подробно описаны специальные методы магнитно-резонансной томографии, применяемые в диагностике черепно-мозговой травмы (МР-цистернография, перфузионная МРТ, МР-спектроскопия, диффузионно-взвешенная и диффузионно-тензорная МРТ). Описаны диагностические возможности, преимущества и недостатки каждого метода.

Ключевые слова: магнитно-резонансная томография, трактография, МР-цистернография, перфузионная МРТ, МР-спектроскопия, функциональная МРТ.

Конфликт интересов: не заявлен.

Для цитирования:

Яриков А.В., Лобанов И.А., Леонов В.А., Фраерман А.П., Николенко С.В. Комплексная нейровизуализация черепно-мозговой травмы: магнитно-резонансная томография. Наука и инновации в медицине. 2020;5(4):239-244. doi: 10.35693/2500-1388-2020-5-4-239-244

Сведения об авторах

Яриков А.В. – к.м.н., нейрохирург. ORCID: 0000-0002-4437-4480

Лобанов И.А. – рентгенолог. ORCID: 0000-0002-1681-5489

Леонов В.А. – нейрохирург. ORCID: 0000-0001-6228-4879

Фраерман А.П. – д.м.н., профессор, нейрохирург, ведущий научный сотрудник группы «Микронейрохирургия». ORCID: 0000-0002-5476-7069

Николенко С.В. – рентгенолог. ORCID: 0000-0002-5536-5562

Автор для переписки

Яриков Антон Викторович

Адрес: пр. Кирова, д. 20 кв. 27,

г. Нижний Новгород, Россия.

E-mail: anton-yarikov@mail.ru

Тел.: +7(950) 618 13 54.

ЧМТ – черепно-мозговая травма; ГМ – головной мозг;

МРТ – магнитно-резонансная томография; КТ – компьютерная томография;

ЗЧЯ – задняя черепная ямка; ДВИ – диффузионно-взвешенное изображение;

МР-Ц – МР-цистернография; фМРТ – функциональная МРТ;

ДТ МРТ – диффузионно-тензорная магнитно-резонансная томография;

ДАП – диффузное аксональное повреждение.

Рукопись получена: 20.07.2020

Рецензия получена: 30.09.2020

Решение о публикации принято: 02.10.2020

Complex neuroimaging of traumatic brain injury: Magnetic resonance imaging

Anton V. Yarikov^{1,3,4}, Igor A. Lobanov², Vasilii A. Leonov³,
Aleksandr P. Fraerman³, Sergei V. Nikolenko³¹Privolzhsky District Medical Center FMBA (Nizhny Novgorod, Russia)²ООО МЦ "Тонус" (Nizhny Novgorod, Russia)³City Clinical Hospital No. 39 (Nizhny Novgorod, Russia)⁴Regional Diagnostic Center (Vladimir, Russia)

Abstract

Traumatic brain injury is one of the most frequent types of injuries and ranks first among the causes of mortality and disability of the working population. The timely diagnosis of brain damage is one of the ways of improving the quality of emergency neurosurgical treatment of severe traumatic brain injury. Choosing the right diagnostic method allows you to assess the volume, severity of the injury and apply the correct treatment tactics.

This paper describes in detail the special methods of magnetic resonance imaging used in the diagnosis of traumatic brain injury (MR cisternography, perfusion MRI, MR spectroscopy, diffusion-weighted and diffusion tensor MRI). The diagnostic capabilities, advantages and disadvantages of each method are discussed.

Keywords: magnetic resonance imaging, tractography, MR cisternography, perfusion MRI, MR spectroscopy, functional MRI.

Conflict of interest: nothing to disclose.

Citation

Yarikov AV, Lobanov IA, Leonov VA, Fraerman AP, Nikolenko SV. Complex neuroimaging of traumatic brain injury: Magnetic resonance imaging. Science & Innovations in Medicine. 2020;5(4):239-244. doi: 10.35693/2500-1388-2020-5-4-239-244

Information about authors

Anton V. Yarikov – PhD, neurosurgeon. ORCID: 0000-0002-4437-4480

Igor A. Lobanov – radiologist. ORCID: 0000-0002-1681-5489

Vasilii A. Leonov – neurosurgeon. ORCID: 0000-0001-6228-4879

Aleksandr P. Fraerman – PhD, Professor, neurosurgeon, leading researcher of the group "Microneurosurgery". ORCID: 0000-0002-5476-7069

Sergei V. Nikolenko – radiologist. ORCID: 0000-0002-5536-5562

Corresponding Author

Anton V. Yarikov

Address: apt.27, b.20 Kirov av.,

Nizhny Novgorod, Russia.

E-mail: anton-yarikov@mail.ru

Phone: +7(950) 618 13 54.

Received: 20.07.2020

Revision Received: 30.09.2020

Accepted: 02.10.2020

■ ВВЕДЕНИЕ

Черепно-мозговая травма (ЧМТ) в настоящее время занимает первое место среди причин летальности и инвалидизации трудоспособного населения развитых стран [1]. Высокие затраты на оказание стационарной нейрохирургической помощи, временная нетрудоспособность, расходы на реабилитацию и выплаты на инвалидное пособие больных обуславливают высокую социально-экономическую значимость ЧМТ [2]. Ежегодно отмечается прогрессивный постоянный рост числа пациентов с ЧМТ [3]. Важное место в определении прогноза и тактики лечения ЧМТ занимает нейровизуализация.

Под нейровизуализацией представляется комплекс обследований, позволяющий визуализировать структуру и функциональное состояние головного мозга (ГМ) [4, 5].

■ ЦЕЛЬ

Представить роль современных методов инструментальной диагностики (магнитно-резонансная томография, в том числе специальные методики) ЧМТ и описать их преимущества и недостатки.

■ МАГНИТНО-РЕЗОНАНСНАЯ ТОМОГРАФИЯ (МРТ)

По сравнению с компьютерной томографией (КТ), МРТ проводится дольше (от 15 мин.) и имеет ряд недостатков, ограничивающих широкое применение этого метода в остром периоде ЧМТ [6, 7].

Так, МРТ противопоказана пациентам с электронными и металлическими имплантатами, инородными телами (пули, осколки, сосудистые клипсы, кардиостимуляторы, слуховые аппараты) [1]. МРТ более чувствительна к выявлению очагов в паренхиме и стволе ГМ, перивентрикулярной зоне, в области задней черепной ямки (ЗЧЯ), а также негеморрагическим повреждениям мозолистого тела, базальных ганглиев, таламусов и ствола ГМ, характерных для диффузного аксонального повреждения (ДАП) [4, 6, 8].

МРТ дает возможность четко визуализировать капсулу при хронических гематомах, направление смещений и деформаций ГМ при дислокации, обладает высокой чувствительностью к очагам ишемии [6, 9, 10]. МРТ является менее чувствительным методом диагностики очагов ушиба-размозжения в первые 24 ч ЧМТ из-за более низкой чувствительности к оксигемоглобину и используется в основном в подостром периоде для оценки динамики зоны перифокального отека. Интенсивность МР-сигнала от очагов ушиба-размозжения и травматических внутримозговых гематом зависит от стадии распада гемоглобина (таблица 1) при ректракции кровяного сгустка [1].

Область перифокального отека вокруг очага ушиба-размозжения ГМ визуализируется в виде зоны низкой интенсивности МР-сигнала на T1-ВИ и повышенной интенсивности на T2-ВИ и режиме FLAIR.

Время от получения ЧМТ	Продукты распада гемоглобина	T1-ВИ	T2-ВИ	FLAIR
< 1 суток	Оксигемоглобин	Изо-	Гипер-	Гипо-
1–3 сутки	Деоксигемоглобин	Изо- или гипо-	Гипо-	Гипо-
4–7 сутки	Внутриклеточный метгемоглобин	Гипер-	Гипо-	Гипо-
8–14 сутки	Свободный метгемоглобин	Гипер-	Гипер-	Гипо-
> 14 суток	Гемосидерин	Гипо-	Гипо-	Гипо-

Таблица 1. Характер интенсивности сигнала по МРТ в очаге ушиба-размозжения и в зависимости от стадии распада гемоглобина

Table 1. The nature of the intensity of the MRI signal in the focus of bruising-crushing and depending on the stage of hemoglobin breakdown

На современных МРТ используются такие импульсные последовательности, как T2-ВИ либо SWI, которые способны визуализировать оксигемоглобин даже в минимальных количествах как включение сигнала высокой либо низкой интенсивности соответственно (рисунок 1) [6]. Однако такое программное обеспечение доступно далеко не в каждой нейрохирургической клинике, а сама программа длится не менее 3 мин.

На МРТ острые оболочечные гематомы имеют гипо- или изоинтенсивность сигнала на T1-ВИ, а на T2-ВИ и FLAIR – слабогиперинтенсивный в первые 24 ч и изо- или гипоинтенсивный в последующие 48 ч с момента получения ЧМТ.

Одной из важнейших задач в оценке состояния пациентов с ЧМТ является определение зон цитотоксического отека как проявления вторичной ишемии. Для этой цели эффективно применяются диффузионно-взвешенные изображения (ДВИ), возникающие за счет движения протонов в тканях ГМ. ДВИ и ADC-карты применяются для дифференциальной диагностики цитотоксического и вазогенного отека вследствие травмы ГМ или ишемии.

Снижение коэффициента диффузии говорит о наличии цитотоксического отека, а увеличение – о развитии вазогенного отека. Особая роль ДВИ отводится в выявлении инфарктов и ДАП [12]. ДВИ в МРТ часто

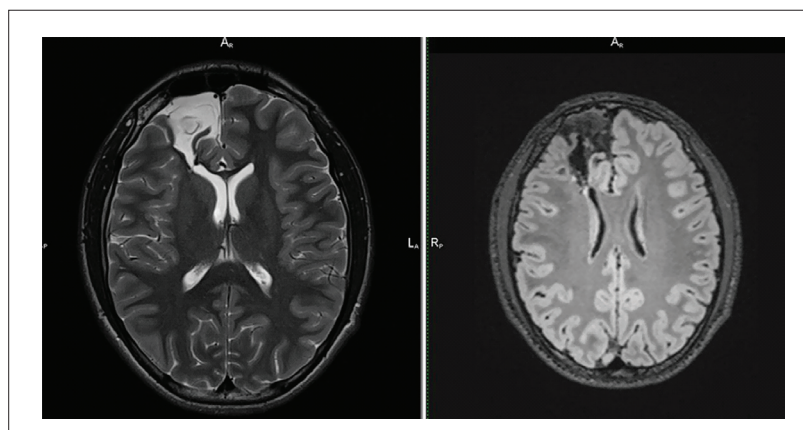


Рисунок 1. Кистозно-глиозные изменения в правой лобной доле.

Слева – T2-ВИ. Справа – FLAIR. Кистозно-глиозные изменения с отложением гемосидерина по периферии.

Figure 1. Cystic-gliotic changes in the right frontal lobe. Left – T1WI mode. Right – FLAIR mode. Cystic-gliotic changes with the deposition of hemosiderin on the periphery.

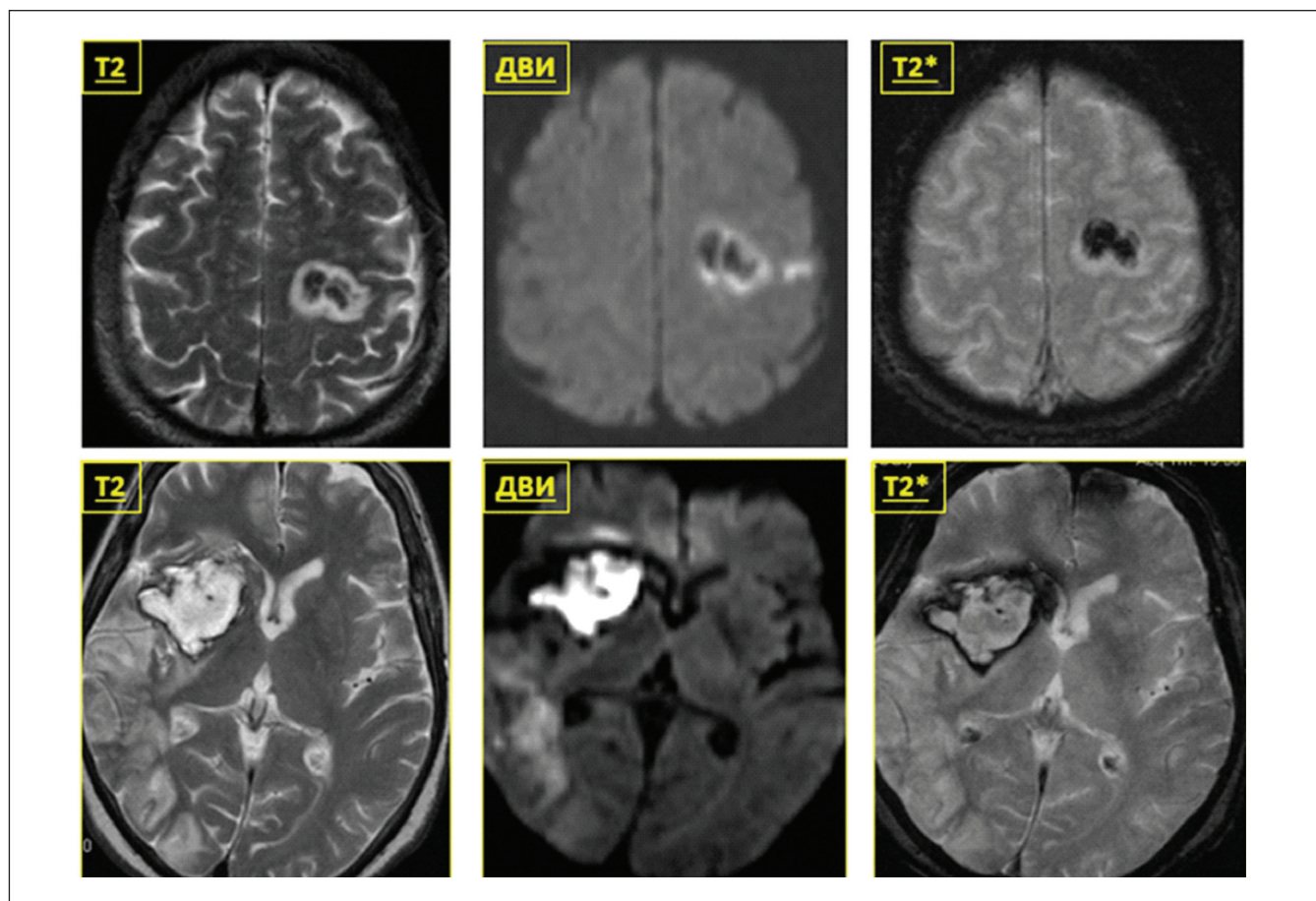


Рисунок 2. ДВИ в определении давности внутримозговой гематомы.

А. Внутримозговая гематома в левом полушарии ГМ. Подострый период, 5-й день.

Б. Внутримозговая гематома в правом полушарии ГМ. Хронический период, 28-й день.

Figure 2. DWI in determining the time of intracerebral hematoma.

A. Intracerebral hematoma in the left hemisphere of the brain. Subacute period, day 5.

B. Intracerebral hematoma in the right hemisphere of the brain. Chronic period, day 28.

применяется для определения давности внутримозговых, внутримозговых гематом и контузионных очагов (рисунок 2).

На МРТ не визуализируются переломы костей черепа [1, 11]. Наиболее типичными изменениями на МРТ в отдаленном периоде ЧМТ являются гипотрофические изменения серого и белого вещества ГМ с соответствующим увеличением размеров его желудочков, ликворных цистерн и субарахноидальных пространств [13].

МР-цистернография (МР-Ц) представляется неинвазивным методом с чувствительностью 80–87%, специфичностью 57–100% на T2-ВИ и точностью до 89% в диагностике базальной ликвореи. МР-Ц дает возможность идентифицировать ликворную фистулу диаметром до 2 мм, локализацию ликвореи и ее ход, а также установление менингоцеле или менингоэнцефалоцеле [14]. Негативная сторона МР-Ц — сложность технического оборудования, длительность выполнения обследования, инвазивность, дороговизна и отсутствие визуализации костных структур.

Принимая во внимание множество методов, их специфичность и недостатки в идентификации ликворной фистулы, большинством клиницистов было предложено применение сочетания нескольких методов (например, с КТ) [10, 15].

Перфузионная МРТ, как и перфузионная КТ, дает возможность оценивать регионарную гемодинамику и перфузию ГМ. У лиц с ЧМТ МР-перфузию в основном используют для динамики формирования вторичных ишемических повреждений, оценки гемодинамики в полушариях ГМ до и после удаления внутримозговых гематом и др. Исследование выполняют или с внутривенным болюсным контрастным усилением препаратами гадолиния, или при помощи метода меченых спинов без использования контраста. Последний способ осуществим лишь на высокопольных МРТ с индукцией магнитного поля 3Т, и достоверность его не доказана. МР-перфузия основана на изменении интенсивности МР-сигнала при перемещении контраста по капиллярам выбранного участка ГМ с дальнейшим построением кривых «концентрация — время» и вычислением тех же показателей регионарного тока крови, что и при перфузионной КТ (CBF, CBV и MTT).

Протонная МР-спектроскопия — метод получения информации о метаболизме отдельных зон ГМ (вокселей). Она позволяет измерить внутриклеточные концентрации низкомолекулярных соединений, присутствующих в цитозоле в свободном состоянии, и получить данные об изменениях концентраций этих веществ [16]. Выделяют *одновоксельную* МР-спектроскопию, при которой анализируют метаболизм одной зоны ГМ,

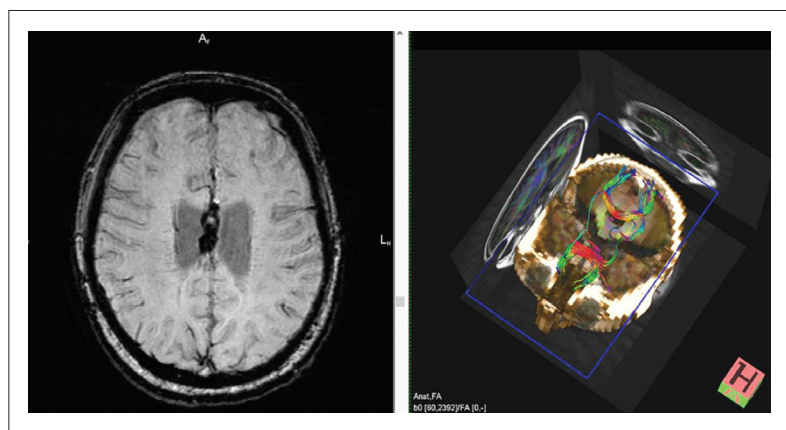


Рисунок 3. ДАП. Справа – изображения в режиме T2-ВИ. Аинтенсивный сигнал в проекции ствола мозолистого тела (отложения гемосидерина). Слева – ДТ МРТ. Разрыв комиссуральных трактов в области ствола мозолистого тела.

Figure 3. DAI. Right – images in T2-WI mode. Aintensive signal in the projection of the corpus callosum trunk (depositions of hemosiderin). Left – DT MRI. Rupture of the commissural tracts in the area of the corpus callosum trunk.

и мультивоксельную, которая дает возможность получить МР-спектры для нескольких выбранных зон. При мультивоксельной МР-спектроскопии происходит построение специальных карт метаболизма ГМ на разных срезах, а далее сравнивается расположение метаболитов в разных вокселях между собой.

Единицей измерения содержания метаболитов представляется миллионная доля (ppm). В каждом вокселе расценивают содержание 7 главных метаболитов ГМ: N-ацетиласпартат (NAA) – 2 ppm, креатин (Cr) – 3,03 ppm, холин (Cho) – 3,22 ppm, миоинозитол (mI) – 3,56 ppm, глутамат и глутамин (Glx) – 2,05–2,5 ppm, лактат (Lac) – 1,33 ppm и липидный комплекс (Lip) – 0,9–1,2 ppm [2].

В норме самый большой пик представлен NAA, который входит в состав разных макромолекул с N-ацетиловой группой. Самая большая концентрация NAA содержится в нейронах и аксонах. Уменьшение NAA при МР-спектроскопии говорит о дегенерации клеток и их некрозе [2]. Высокое содержание NAA связывают с высоким уровнем неповрежденных нейронов [16]. Увеличение Cr отражает состояние энергозависимых систем ГМ, он всегда представляется стабильным, и его применяют в качестве референсного при сравнении пиков других метаболитов. Cho входит в состав липидов мембран клеток и их миелиновых оболочек. Увеличение интенсивности сигнала Cho является признаком демиелинизации, повреждении мембран или активации пролиферации клеток (опухоль ГМ) [16]. Миоинозитол (mI) представляется предшественником фосфотидилинозитола, входящего в состав клеточных мембран, а также содержится в глиальных клетках, следовательно, может быть маркером их повреждения. Glx представляется маркером эксайтотоксичности, увеличение его указывает на повреждение клеточной стенки.

Лас представляется маркером энергетического обмена в клетках и не обнаруживается в спектрах нормального ГМ. Увеличение Лас указывает на доминирование процессов анаэробного гликолиза над аэробным и выражает степень ишемии ГМ [9, 17]. Увеличение Лас также обнаруживается в зоне накопления макрофагов (например, при остром воспалении) [16]. Сигналы Lip не фиксируются в нормальной ткани ГМ и возникают из-за разрушения клеточной мембраны в зонах некроза [16]. При исследовании метаболизма ГМ в зоне отека вещества ГМ происходит увеличение содержания Лас, ацетата и альгината, что говорит о росте интенсивности анаэробного окисления. Концентрация Glx сначала растет, но падает к концу 24 ч ниже уровня контралатеральных отделов, отмечается также и уменьшение содержания NAA, что является свидетельством разрушения ткани ГМ [18].

МР-спектроскопия применяется при оценке тяжести вторичных повреждений ГМ при ЧМТ.

Принцип *функциональной МРТ* (фМРТ) основан на усилении локального тока крови в участках нейрональной активности коры ГМ в результате влияния чувствительного или двигательного раздражителя [19, 20].

К физиологическим эффектам стимуляции ГМ относится вазодилатация, в результате которой увеличиваются локальный объем крови (CBV) и скорость кровотока (CBF) [16]. Физико-химическим эффектом нейроактивации является снижение концентрации дезоксигемоглобина (dHb) и увеличение оксигенированного гемоглобина, которое детектируется как BOLD-сигнал (blood oxygen level dependent) [21]. dHb является парамагнетиком, ограниченным внутриклеточным пространством эритроцита, который в свою очередь ограничен пространством сосуда. Анализ временных зависимостей изменения контраста,

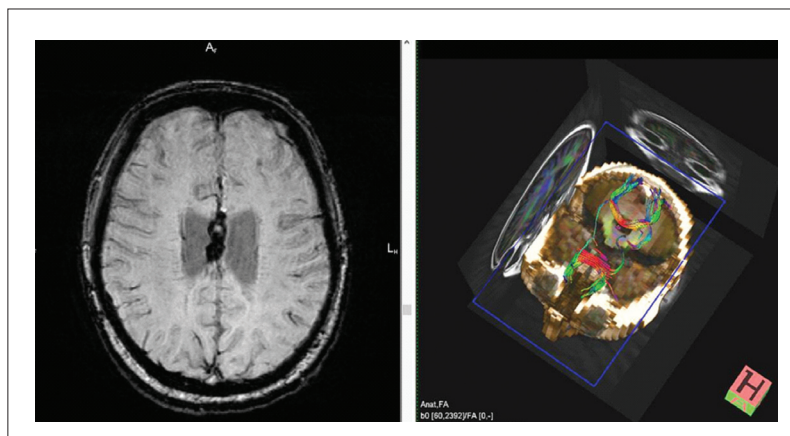


Рисунок 4. Последствия ЧМТ. Слева – ДТ МРТ. Разрыв проекционных трактов в области кистозно-глиозных изменений. Справа – режим T2-ВИ. Аинтенсивный сигнал по периферии кистозно-глиозных изменений (отложения гемосидерина).

Figure 4. Consequences of TBI. Left – DT MRI. Rupture of the projection tracts in the area of cystic-gliotic changes. Right – T2-WI mode. Aintensive signal on the periphery of the cystic-gliotic changes (depositions of hemosiderin).

вызванного изменением концентрации dHb относительно концентрации оксигенированного гемоглобина, дает возможность оценить влияние нейроактивации на локальные скорости потребления кислорода и глюкозы [16]. При последующей обработке данные зоны выделяют цветом и строят карты нейрональной активности, которые в дальнейшем накладывают на T1-ВИ и 3D-модели ГМ [17].

В нейрохирургической практике у лиц с ЧМТ фМРТ используется при планировании оперативного подхода к очагам повреждения ГМ в функционально значимой зоне, а также в резидуальном периоде ЧМТ для идентификации посттравматических очагов эпилепсии [21]. фМРТ представляется методом выбора при оценке когнитивного дефицита у лиц с ЧМТ легкой степени. фМРТ может применяться в оценке прогноза восстановления уровня бодрствования и нейропсихологических функций у людей с ЧМТ, длительно находящихся в вегетативном состоянии, и при планировании хирургических вмешательств у лиц с очагами-размножениями ГМ, локализуемыми в функционально значимой зоне [2, 9].

В процессе диффузии молекулы воды способны передвигаться в определенном направлении [5]. Это физическое явление называется анизотропией диффузии. На данном принципе и основана **диффузионно-тензорная МРТ** (ДТ МРТ), которая дает возможность визуализировать анизотропию молекул воды в разных участках ГМ [22]. В белом веществе ГМ молекулы воды могут легко диффундировать вдоль нервных волокон, формирующих крупные нервные тракты и проводящие пути ГМ, поэтому ДТ МРТ называют еще **трактографией** (метод нейровизуализации трактов) [23].

Тракты белого вещества ГМ принято делить на 3 основные категории [23]: комиссуральные — соединяют гемисферы ГМ; ассоциативные — соединяют корковые структуры в полушарии; проекционные — соединяют корковые, подкорковые и стволовые структуры.

ДТ МРТ расценивает степень целостности проводящих путей, различие в миелинизации волокон, их диаметр. В основном определяют ход самых больших комиссуральных и проекционных трактов ГМ: мозолистого тела, кортикоспинальных трактов и волокон, проходящих через внутреннюю капсулу (**рисунки 3 и 4**) [2, 5, 9].

У лиц, перенесших дислокационный синдром со сдавлением ножки ГМ, в последующем формируется дегенерация волокон одного из кортикоспинальных трактов, что сопровождается развитием гемиплегии. ДТ МРТ у людей с ЧМТ используют для оценки динамики течения ДАП и в диагностике постдислокационных изменений [2]. При ДАП из-за дегенерации комиссуральных и восходящих нервных волокон через 3–4 месяца после ЧМТ фиксируется феномен «облысения» мозолистого тела, что представляется неблагоприятным прогностическим знаком восстановления сознания и психической деятельности [9, 24].

■ ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Хотя в настоящее время «золотым стандартом» обследования пациентов с острой ЧМТ является КТ, МРТ не утратила своего практического значения. У лиц с тяжелой ЧМТ при подозрении на повреждение структур ЗЧЯ или ДАП показано выполнение МРТ. В резидуальном периоде ЧМТ с целью оценки прогноза восстановления уровня бодрствования, двигательных и психических функций показана ДТ МРТ и фМРТ.

МР-Ц, протонная МР-спектроскопия и перфузионная МРТ в настоящее время потеряли практическую значимость в диагностике ЧМТ и имеют больше историческую и научную ценность. ■

Конфликт интересов: все авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Puras YuV, Grigoreva EV. Neuroimaging methods in the diagnosis of traumatic brain injury. Part 1. Computer and magnetic resonance imaging. *Nejrohirurgiya*. 2014;2:7–16. (In Russ.). [Пурас Ю.В., Григорьева Е.В. Методы нейровизуализации в диагностике черепно-мозговой травмы. Часть 1. Компьютерная и магнитно-резонансная томография. *Нейрохирургия*. 2014;2:7–16].
2. Puras YuV, Grigoreva EV. Neuroimaging methods in the diagnosis of traumatic brain injury. Part 2. Computer and magnetic resonance imaging (special techniques). *Nejrohirurgiya*. 2014;3:6–13. (In Russ.). [Пурас Ю.В., Григорьева Е.В. Методы нейровизуализации в диагностике черепно-мозговой травмы. Часть 2. Компьютерная и магнитно-резонансная томография (специальные методики). *Нейрохирургия*. 2014;3:6–13].
3. Fraerman AP. Traumatic compression of the brain: current aspects of the problem, treatment tactics. *Sovremennye tekhnologii v medicine*. 2011;4:146–150. (In Russ.). [Фраерман А.П. Травматическое сдавление головного мозга: современные аспекты проблемы, тактика лечения. *Современные технологии в медицине*. 2011;4:146–150].
4. Potapov AA, Krylov VV, Gavrilov AG, et al. Recommendations for the diagnosis and treatment of severe traumatic brain injury (Part 1). Organization of medical care and diagnostics. *Voprosy nejrohirurgii im. N.N. Burdenko*. 2015;79(6):100–106. (In Russ.). [Потапов А.А., Крылов В.В., Гаврилов А.Г. и др. Рекомендации по диагностике и лечению тяжелой черепно-мозговой травмы (Часть 1). Организация медицинской помощи и диагностика. *Вопросы нейрохирургии им. Н.Н. Бурденко*. 2015;79(6):100–106].
5. Potapov AA, Lihterman LB, Kravchuk AD, et al. Modern approaches to the study and treatment of traumatic brain injury. *Annaly klinicheskoy i eksperimental'noj neurologii*. 2010;4(1):4–12. (In Russ.). [Потапов А.А., Лихтерман Л.Б., Кравчук А.Д. и др. Современные подходы к изучению и лечению черепно-мозговой травмы. *Анналы клинической и экспериментальной неврологии*. 2010;4(1):4–12].
6. Litvinenko IV, Yurin AA, Efimcev AYU, et al. New features of neuroimaging in traumatic brain injury. *Izvestiya Rossijskoj Voenno-meditsinskoj akademii*. 2016;35(2):24–28. (In Russ.). [Литвиненко И.В., Юрин А.А., Ефимцев А.Ю. и др. Новые возможности нейровизуализации при черепно-мозговой травме. *Известия Российской Военно-медицинской академии*. 2016;35(2):24–28].
7. Dreval ON, Lazarev VA, Dzhindzhidze RS, Danchenko IA. Neuroimaging diagnosis of intracranial hypertension (neurosurgical aspects). *Meditsinskaya vizualizaciya*. 2010;4:40–51. (In Russ.). [Древал О.Н., Лазарев В.А., Джинджидзе Р.С., Данченко И.А. Нейровизуализационная диагностика внутричерепной гипертензии (нейрохирургические аспекты). *Медицинская визуализация*. 2010;4:40–51].
8. Potapov AA, Zaharova NE, Kornienko VN, et al. Neuroanatomical basics of traumatic coma: clinical and magnetic resonance correlates. *Voprosy' nejrohirurgii im. N.N. Burdenko*. 2014;78(1):4–13. (In Russ.). [Потапов А.А., Захарова Н.Е., Корниенко В.Н. и др. Нейро-

- анатомические основы травматической комы: клинические и магнитно-резонансные корреляты. *Вопросы нейрохирургии им. Н.Н. Бурденко*. 2014;78(1):4–13].
9. Hershey BL, Faro SH, Shan PN, et al. Introduction to brain injury imaging. In the book: "Neurotrauma and critical care of the brain". Edited by Jallo J, Loftus CM. New York – Stuttgart: Thieme, 2009:97–141.
 10. Shaginyan GG, Makarevich DA, Nikitina OO. The problem of basal liquorrhea in patients with severe craniofacial trauma (historical aspects). *Nejrohirurgiya i nevrologiya Kazahstana*. 2010;4(24):11–19. (In Russ.). [Шагинян Г.Г., Макаревич Д.А., Никитина О.О. Проблема базальной ликвореи у больных с тяжелой краниофациальной травмой (исторические аспекты). *Нейрохирургия и неврология Казахстана*. 2010;4(24):11–19].
 11. Dorovskih GN. Comparative analysis of the sensitivity and specificity of various methods of radiation diagnosis in polytrauma. *Byulleten Vostochno-Sibirskogo nauchnogo centra Sibirskogo otdeleniya Rossijskoj akademii medicinskih nauk*. 2014;4(98):24–28. (In Russ.). [Доровских Г.Н. Сравнительный анализ чувствительности и специфичности различных методов лучевой диагностики при политравме. *Бюллетень Восточно-Сибирского научного центра Сибирского отделения Российской академии медицинских наук*. 2014;4(98):24–28].
 12. Naacke E, Duhaime A, Gean A, et al. Common data elements in radiologic imaging of traumatic brain injury. *JMRI*. 2010;32(3):516–543.
 13. Shcherbuk YuA, Strelnikov AA, Malikov AS, et al. Comprehensive neuropsychiatric and neuroimaging assessment of the condition of patients in the remote period of closed traumatic brain injury. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Medicina*. 2009;1:131–137. (In Russ.). [Щербук Ю.А., Стрельников А.А., Маликов А.С. и др. Комплексная психоневрологическая и нейровизуализационная оценка состояния больных в отдаленном периоде закрытой черепно-мозговой травмы. *Вестник Санкт-Петербургского университета. Медицина*. 2009;1:131–137].
 14. Godkov IM, Levchenko OV. Post-traumatic basal liquorrhea (Part 1). Diagnosis. *Nejrohirurgiya*. 2012;1:62. (In Russ.). [Годков И.М., Левченко О.В. Посттравматическая базальная ликворея (Часть 1). Диагностика. *Нейрохирургия*. 2012;1:62].
 15. Godkov IM, Levchenko OV, Turovskij AB, et al. Blind penetrating cranioorbital wound with a sword. *Nejrohirurgiya*. 2011;4:62–68. (In Russ.). [Годков И.М., Левченко О.В., Туровский А.Б. и др. Слепое проникающее краниоорбитальное ранение шпагой. *Нейрохирургия*. 2011;4:62–68].
 16. Ublinskij MV, Manzhurcev AV, Menshchikov PE, et al. Multimodal studies of the human brain using functional magnetic resonance imaging and magnetic resonance spectroscopy. *Annaly klinicheskoy i eksperimental'noj nevrologii*. 2018;12(1):54–60. (In Russ.). [Ублинский М.В., Манжурцев А.В., Меньшиков П.Е. и др. Мультимодальные исследования головного мозга человека с использованием функциональной магнитно-резонансной томографии и магнитно-резонансной спектроскопии. *Анналы клинической и экспериментальной неврологии*. 2018;12(1):54–60].
 17. Krylov VV, Petrikov SS, Talypov AE, et al. Modern principles of surgery for severe traumatic brain injury. *Zhurnal im. N.V. Sklifosovskogo Neotlozhnaya medicinskaya pomoshch*. 2013;4:39–47. (In Russ.). [Крылов В.В., Петриков С.С., Талыпов А.Э. и др. Современные принципы хирургии тяжелой черепно-мозговой травмы. *Журнал им. Н.В. Склифосовского Неотложная медицинская помощь*. 2013;4:39–47].
 18. Adams JH, Graham DI, Murray LS, Scott G. Diffuse axonal injury due to nonmissile head injury in humans: an analysis of 45 cases. *Ann Neurol*. 1982;12(6):557–563. doi.org/10.1002/ana.410120610
 19. Muhina TS, Sharova EV, Boldyreva GN, et al. Features of the neuroanatomy of active arm movement in patients with severe traumatic brain injury (analysis of functional magnetic resonance imaging data). *Nevrologiya, nevropsihiatriya, psichosomatika*. 2017;9(1):27–33. (In Russ.). [Мухина Т.С., Шарова Е.В., Болдырева Г.Н. и др. Особенности нейроанатомии активного движения руки у пациентов с тяжелой черепно-мозговой травмой (анализ данных функциональной магнитно-резонансной томографии). *Неврология, нейропсихиатрия, психосоматика*. 2017;9(1):27–33].
 20. Boldyreva GN, Sharova EV, Zhavoronkova LA, et al. Comparison of fMRI reactions of the brain of healthy people with active, passive and imaginary hand movements. *Medicinskaya vizualizatsiya*. 2015;5:100–112. (In Russ.). [Болдырева Г.Н., Шарова Е.В., Жаворонкова Л.А. и др. Сопоставление фМРТ-реакций мозга здоровых людей при активных, пассивных и воображаемых движениях рукой. *Медицинская визуализация*. 2015;5:100–112].
 21. Tokarev AS, Stepanov VN, Shatohina YuI, et al. The use of functional magnetic resonance imaging of the brain in neurosurgery. *Nejrohirurgiya*. 2017;2:3–10. (In Russ.). [Токарев А.С., Степанов В.Н., Шатохина Ю.И. и др. Применение функциональной магнитно-резонансной томографии головного мозга в нейрохирургии. *Нейрохирургия*. 2017;2:3–10].
 22. Krotenkova MV, Bryuhov VV, Morozova SN, et al. Modern technologies of neuroimaging (lecture). *Radiologiya – praktika*. 2017;2(62):47–63. (In Russ.). [Кротенкова М.В., Брюхов В.В., Морозова С.Н. и др. Современные технологии нейровизуализации (лекция). *Радиология – практика*. 2017;2(62):47–63].
 23. Pronin IN, Fadeeva LM, Zaharova NE, et al. Diffusion tensor magnetic resonance imaging and tractography. *Annaly klinicheskoy i eksperimental'noj nevrologii*. 2008;2(1):32–40. (In Russ.). [Пронин И.Н., Фадеева Л.М., Захарова Н.Е. и др. Диффузионная тензорная магнитно-резонансная томография и трактография. *Анналы клинической и экспериментальной неврологии*. 2008;2(1):32–40].
 24. Zaharova NE, Potapov AA, Kornienko VN, et al. A dynamic study of the structure of the corpus callosum and corticospinal tract using diffusion-tensor magnetic resonance imaging with diffuse axonal damage. *Voprosy nejrohirurgii im. N.N. Burdenko*. 2010;3:3–10. (In Russ.). [Захарова Н.Е., Потапов А.А., Корниенко В.Н. и др. Динамическое исследование структуры мозолистого тела и кортикоспинальных трактов с помощью диффузионно-тензорной магнитно-резонансной томографии при диффузном аксональном повреждении. *Вопросы нейрохирургии им. Н.Н. Бурденко*. 2010;3:3–10].