



ПРОДОЛЖЕННОЕ МЕДИЦИНСКОЕ ОБРАЗОВАНИЕ

Обзорная статья.
УДК 616-001.31
<https://doi.org/10.52560/2713-0118-2022-1-77-90>

Диффузионно-тензорная и диффузионно-куртозисная магнитно-резонансная томография в оценке диффузного аксонального повреждения (обзор литературы)

Р. М. Афандиев*, Н. Е. Захарова, Э. Л. Погосбекян, А. А. Потапов, И. Н. Пронин

ФГАУ «НМИЦ нейрохирургии им. академика Н. Н. Бурденко» Минздрава России, Москва

Реферат

Черепно-мозговая травма (ЧМТ) является главной причиной инвалидизации и смертности людей трудоспособного возраста, а функциональные нарушения после травмы могут сохраняться в самые продуктивные годы жизни пострадавших. Одним из основных видов ЧМТ является диффузное аксональное повреждение (ДАП). Распространенность ДАП часто недооценивается при компьютерной томографии (КТ) и рутинной магнитно-резонансной томографии (МРТ). В таких случаях диффузионно-тензорная (ДТ МРТ) и диффузионно-куртозисная магнитно-резонансная томография (ДК МРТ) дают дополнительную информацию о целостности вещества головного мозга, которая не может быть оценена с помощью стандартной МРТ. В данном обзоре мы рассмотрели вклад методов ДТ МРТ и ДК МРТ в понимание патофизиологии и прогноза ДАП в помощь специалистам, заинтересованным в планировании новых исследований и участвующим в оказании помощи пациентам с ЧМТ.

Ключевые слова: диффузное аксональное повреждение, черепно-мозговая травма, магнитно-резонансная томография, диффузионно-тензорная магнитно-резонансная томография, диффузионно-куртозисная магнитно-резонансная томография.

Финансирование исследования и конфликт интересов

Исследование не финансировалось какими-либо источниками. Авторы заявляют, что данная работа, ее тема, предмет и содержание не затрагивают конкурирующих интере-

* **Афандиев Рамин Малик оглы**, аспирант отделения рентгеновских и радиоизотопных методов диагностики ФГАУ «НМИЦ нейрохирургии им. академика Н. Н. Бурденко» Минздрава России.

Адрес: 125047, г. Москва, ул. Тверская-Ямская, д. 16.
Тел.: +7 (919) 999-88-21. Электронная почта: rafandiev@nsi.ru
ORCID.org/0000-0001-6384-7960

Afandiev Ramin Malik ogly, Postgraduate of Department of X-ray and radioisotope diagnostic methods, N. N. Burdenko National Medical Research Center of Neurosurgery, Ministry of Healthcare of Russia.

Address: 16, ul. Tverskaya-Yamskaya, 16, Moscow, 125047, Russia.
Phone number: +7 (919) 999-88-21. E-mail: rafandiev@nsi.ru
ORCID.org/0000-0001-6384-7960

© Р. М. Афандиев*, Н. Е. Захарова, Э. Л. Погосбекян, А. А. Потапов, И. Н. Пронин.

сов. 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).

THE CONTINUED MEDICAL EDUCATION

Review article.

Diffusion-tensor and Diffusion-kurtosis Magnetic Resonance Imaging in the Assessment of Diffuse Axonal Injury (Literature Review)

R. M. Afandiev*, N. E. Zakharova, E. L. Pogosbekyan, A. A. Potapov, I. N. Pronin

N. N. Burdenko National Medical Research Center of Neurosurgery, Ministry of Healthcare of Russia, Moscow

Abstract

Traumatic brain injury (TBI) is the main cause of disability and mortality among young people, and neurological dysfunctions can persist many years after injury. One of the main type of TBI is diffuse axonal injury (DAI). The prevalence of diffuse axonal injury is often underestimated in computed tomography (CT) and routine magnetic resonance imaging (MRI). In such cases, diffusion-tensor MRI (DT MRI) and diffusion-kurtosis MRI (DK MRI) provide additional information about the integrity of the brain tissue, which cannot be obtained using standard MRI. In this review, we examined the contribution of DT MRI and DK MRI methods to understanding the pathophysiology and prognosis of DAI to help experts interested in planning new studies and participating in the care of patients with TBI.

Key words: Diffuse Axonal Injury; Traumatic Brain Injury; Magnetic Resonance Imaging; Diffusion-Tensor Magnetic Resonance Imaging; Diffusion-Kurtosis Magnetic Resonance Imaging.

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

Черепно-мозговая травма (ЧМТ) является одной из основных социально значимых проблем здравоохранения из-за ее большой распространенности. Травматические повреждения головного мозга мо-

гут привести к снижению качества жизни, инвалидизации и летальным исходам. В связи с этим диагностика, а также оказание своевременной и адекватной медицинской помощи пострадавшим

имеют важное значение для минимизации серьезных социальных и экономических последствий ЧМТ [10].

У пациентов с ДАП часто выявляется несоответствие между клиническим статусом (чаще при средней тяжести и тяжелой травме) и результатами первичных данных КТ с отсутствием или минимальными патологическими изменениями на изображениях. Более того, некоторые пациенты полностью функционально восстанавливаются, а другие остаются тяжелыми инвалидами. Таким образом, очень важно понимать патофизиологию ДАП и способствовать разработке современных неинвазивных методов нейровизуализации для более точного определения распространенности повреждений головного мозга.

ДАП является одним из самых тяжелых видов ЧМТ, для которого характерны растяжение аксонов, их отек, разрывы, формирование ретракционных аксональных шаров с последующим развитием валлеровской дегенерации [6]. После прямого повреждения аксонов определяются микроскопические множественные изменения, включающие гибель клеток, синаптическую дисфункцию, активацию глиальных клеток и патологическое отложение белков (бета-амилоида и тау-белков). Механизм повреждения основан на инерции мозга: при быстром и сильном ускорении, замедлении и ротации мозговые структуры с разной плотностью (серое и белое вещество) испытывают разной степени силы сдвиг и напряжение, растягивающие и повреждающие аксоны [10]. Чаще поражаются мозолистое тело, свод, ствол головного мозга, подкорковое белое вещество и субкортикальные отделы белого вещества. В ре-

зультате повреждения у пострадавших уровень сознания моментально может снижаться до комы (шкала комы Глазго (ШКГ) ≤ 8), в таких случаях повышается вероятность поражения ствола мозга, и прогноз исхода для этого пациента ухудшается.

Цель: рассмотреть вклад методов ДТ МРТ и ДК МРТ в понимание патофизиологии и прогноза ДАП в помощь специалистам, заинтересованным в планировании новых исследований и участвующим в оказании помощи пациентам с ЧМТ.

Нейровизуализационные исследования пациентов с ЧМТ основаны на данных компьютерной томографии (КТ) и магнитно-резонансной томографии (МРТ). Методом выбора для первичного обследования является КТ — быстрый и точный метод для выявления жизнеугрожающих повреждений и состояний, требующих незамедлительного нейрохирургического вмешательства.

Часто определяется несоответствие между результатами КТ и клинической картиной у пациентов с ДАП. По некоторым данным, петехиальные кровоизлияния в области мозолистого тела и субкортикальной локализации обнаруживаются только у 10 % всех пациентов с ДАП [16].

МРТ, несмотря на то что она менее доступна и требует более длительного времени сканирования, чем КТ, является более точным методом для оценки изменений вещества головного мозга при травматических повреждениях, поскольку лучше идентифицирует анатомические особенности и имеет более высокое пространственное разрешение (рис. 1).

Современные методы нейровизуализации, такие как диффузионно-тензорная (ДТ МРТ), в которой исполь-

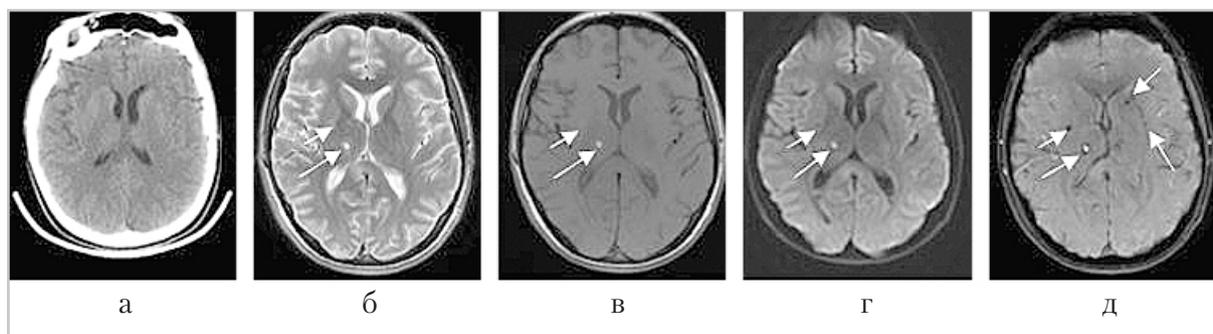


Рис. 1. Компьютерная томограмма (а) и магнитно-резонансные томограммы (б – д) головного мозга пациента с ДАП через 11 дней после травмы в дорожно-транспортном происшествии: а – КТ, б – режим Т2-ВИ, в – Т1, г – ДВИ, д – SWAN. На аксиальной КТ (а) очаговых изменений головного мозга не определяется. На сериях аксиальных МР-томограмм (б – д) выявляется многоочаговое травматическое поражение головного мозга (ДАП) (белые стрелки)

зуется гауссовская модель диффузии воды, и диффузионно-куртозисная магнитно-резонансная томография (ДК МРТ) на основе негауссовской модели, более чувствительны в оценке изменений в областях мозга, которые кажутся неповрежденными на рутинных последовательностях МРТ, особенно у пациентов с ДАП [16].

ДТ МРТ позволяет получить информацию, касающуюся амплитуды и направленности (анизотропии) диффузии воды в тканях. По данным исследований [2, 19] было выявлено, что параметры фракционной анизотропии (ФА) в мозолистом теле и по ходу кортикоспинальных трактов при тяжелом ДАП коррелируют с исходами. В связи с этим ДТ МРТ зарекомендовала себя как надежный метод исследования микроструктуры белого вещества мозга. Также ДТ МРТ используется при реконструкции волокон белого вещества мозга, что позволяет визуализировать степень повреждения основных, функционально значимых, трактов в остром периоде травмы и последующую их дегенерацию [19].

Для получения количественной характеристики диффузии вдоль различных направлений была предложена тензорная модель. Измеряя МР-сигнал в каждом вокселе, по крайней мере, в 6 различных направлениях диффузионного градиента МРТ, можно определить диффузию воды вдоль любого направления для данного вокселя.

Коэффициент ФА характеризует степень выраженности одного основного направления диффузии. Коэффициент средней диффузии (СД) показывает среднее значение диффузии по всем направлениям в выбранном вокселе [5]. Другими количественными параметрами ДТ МРТ являются радиальный (РД) и аксиальный коэффициенты диффузии (АД). АД – это диффузия вдоль главного направления тензора, а РД равна диффузии усредненной по двум другим направлениям тензора.

Некоторые параметры сканирования МР-изображений влияют на точность вычисления диффузионных коэффициентов. Для большинства исследований мозга значение фактора диффузии $b = 1000$ с/мм² является на-

и более адекватным и приводит к эффективному компромиссу между чувствительностью и соотношением сигнал/шум. В идеале изображения должны быть получены с высоким изотропным пространственным разрешением (1–2 мм³) и как можно большим количеством направлений градиента (оптимальное — не менее 32). Однако существует компромисс между оптимальными параметрами полученных данных и временем сканирования.

Существует несколько методов получения параметров при ДТ МРТ: с использованием зон интереса, воксельного анализа и трактографии.

При анализе области интереса (ROI) параметры диффузии получают из заданной области мозга или вокруг определенной анатомической структуры. После определения ROI получают средние значения параметров диффузии воды (измеряемый коэффициент диффузии (ИКД), АД, РД, ФА). Одним из преимуществ этого метода является то, что можно оценивать даже небольшие области мозга. Анализ области интереса выявляет даже незначительные изменения и, таким образом, является одним из самых разумных и простых, доступных аналитических методов [9].

Mac Donald et al. (2007) [15] продемонстрировали, что ДТ МРТ может обнаруживать повреждение белого вещества головного мозга у мыши при ДАП и определять приблизительное время травмы. Эти авторы получили параметры диффузии с помощью анализа ROI в мозолистом теле и наружной капсуле и сравнили результаты с данными гистологической и электронной микроскопии. Показатели анизотропии были ниже в группе животных с травматическим повреждением головного моз-

га. Во время ранней острой фазы (менее одного дня) АД была снижена, а повреждение аксонов было подтверждено морфологически. Во время подострой фазы (от одной недели до одного месяца после травмы) уменьшение анизотропии сопровождалось увеличением АД, РД и СД, что отражало преобладание демиелинизации и отека при морфологической оценке. Авторы предположили, что, если подобная механика присутствует при ЧМТ человека, эти изменения ДТ МРТ могут быть использованы для клинических исследований [15].

В другом исследовании Edlow et al. (2016) [8] было проанализировано 11 пострадавших с ЧМТ в острой (менее семи дней) и подострой (от восьми дней до выписки) стадиях и сопоставлены результаты ДТ МРТ со шкалой инвалидности (disability rating scale). 11 областей интереса были выбраны на основе предыдущих исследований, которые продемонстрировали связь между ФА и функциональными или когнитивными исходами при ЧМТ. Во время острой фазы значения ФА были ниже, чем в подострой стадии, по мнению авторов, из-за отека мозга. Следовательно, показатели в подостром периоде с большей вероятностью отражают структурную целостность аксонов. Таким образом, эти авторы предположили, что оптимальное время сбора данных ДТ МРТ для прогноза ЧМТ может быть во время подострой стадии травмы [8].

Воксельный анализ — метод, который подходит для глобального анализа паренхимы мозга и особенно полезен для сравнений больших групп пациентов без значительных искажений анатомии мозга, поэтому чаще используется у пациентов с легкой ЧМТ. Воксельный анализ стал популярным, потому что его

автоматическая постобработка требует минимального вмешательства и меньшей зависимости от опыта исследователя [9].

Исследование Xu J. et al. (2007) [18] показало обширные изменения в основных трактах белого вещества внутри и между полушариями у пациентов с ДАП. Авторы выполнили как анализ ROI, так и воксельный анализ у девяти пациентов с последствиями ЧМТ (через четыре года после травмы) и у 11 здоровых добровольцев. Результаты показали значительно более низкие значения ФА в мозолистом теле, внутренней и наружной капсулах, верхних и нижних продольных пучках и в своде в группе пациентов с последствиями ЧМТ [18].

Lipton et al. (2008) [14] ретроспективно проанализировали 17 пациентов с легкой ЧМТ и когнитивными нарушениями, которым сделали МРТ-исследования в период от восьми месяцев до трех лет после травмы, и сравнили этих пациентов с контрольной группой из 10 человек. На основе воксельного анализа было показано несколько областей с более низкими значениями ФА и высокой СД в белом веществе с обеих сторон, особенно в мозолистом теле, подкорковом белом веществе и внутренних капсулах [14].

В работе Chu Z. et al. (2010) [7] применялся анализ на основе вокселей и анализ ROI у 10 пациентов-подростков с легкой ЧМТ, которых исследовали в течение одной недели после травмы и сравнивали с контрольной группой. Результаты показали увеличение ФА и снижение РД во многих областях мозга, что может быть связано с аксональным цитотоксическим отеком и отражать острое повреждение [7].

Трехмерное моделирование трактов белого вещества, известное как

трактография, все чаще используется в клинической практике при предоперационной оценке пациентов с опухолями. Визуализация функционально значимых трактов помогает при планировании операций для минимизации послеоперационных осложнений. Трактография позволяет визуализировать белое вещество, и эта информация может быть особенно полезной в анатомо-функциональных исследованиях, потому что различные пучки белого вещества отвечают за специфические когнитивные, языковые, поведенческие и моторные функции. Использование ДТ МРТ при ЧМТ позволяет определить количественные и качественные изменения волокон белого вещества мозга, что дает возможность глубже проникнуть в основы патогенеза травмы.

Алгоритмы трактографии можно условно разделить на две категории: детерминированные и вероятностные (рис. 2). FACT (fiber assignment by continuous tracking) — это детерминированный метод на основе ДТ МРТ, который давно интегрирован в нейрохирургическую практику и довольно активно используется в современных нейронавигационных системах. Алгоритм FACT получил распространение вследствие высокой информативности, простоты проведения и постобработки. С помощью этой модели в каждом вокселе возможно оценить только одно направление волокна [1]. Однако ранее было доказано, что до 90 % вокселей белого вещества в головном мозге содержат пересекающиеся волокна [13].

Существуют некоторые важные недостатки, которые необходимо учитывать при анализе детерминированной трактографии. Этот метод оценивает анатомию проводящих путей мозга на

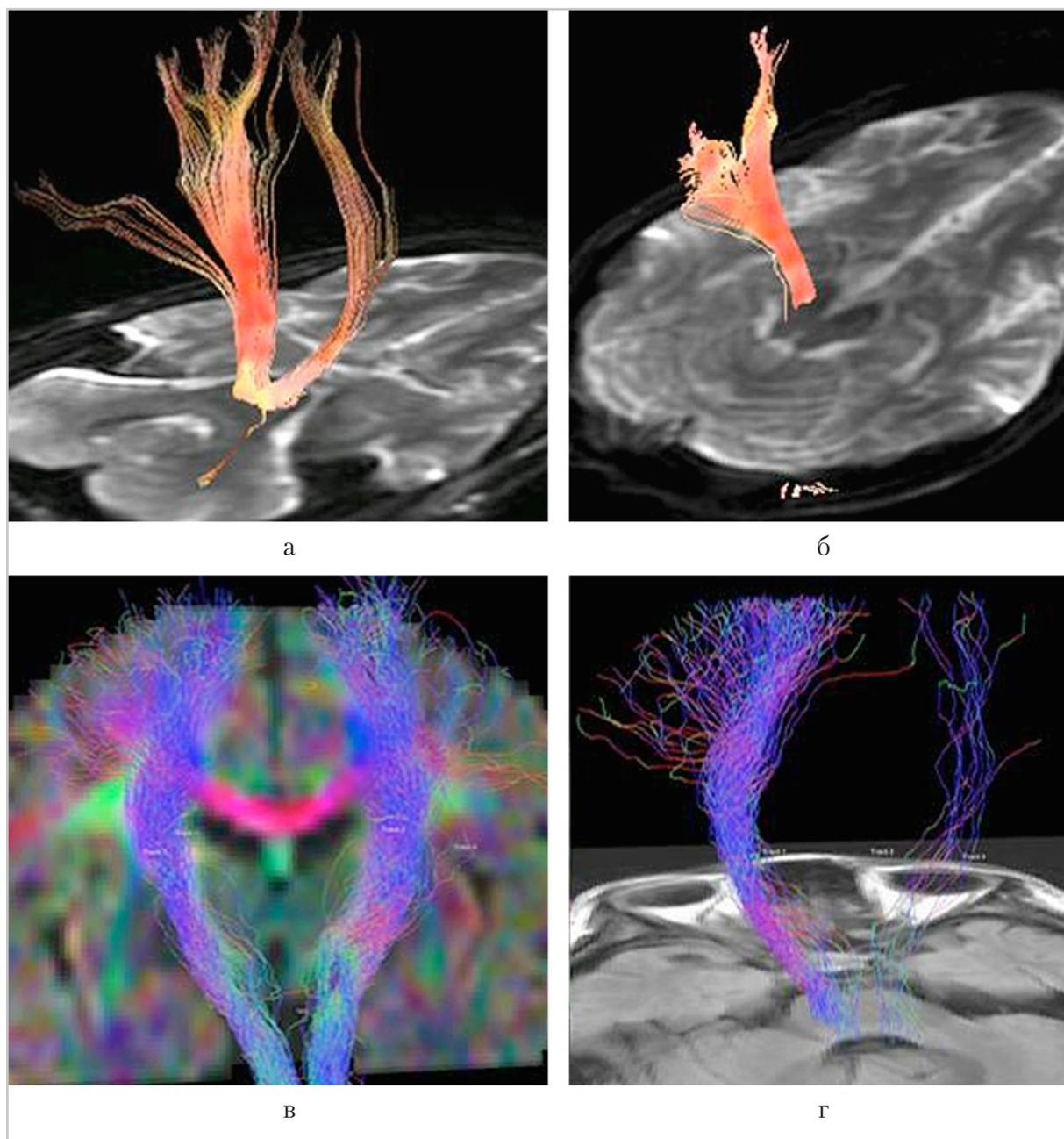


Рис. 2. FACT (а, б) и HARDI-CSD-трактография (в, г). Трехмерная реконструкция кортикоспинальных трактов пациентки с ДАП через 11 дней после травмы (а, в) в дорожно-транспортном происшествии и в динамике через 2 мес, где определяется отсутствие волокон одного из кортикоспинальных трактов (б). HARDI-CSD-трактография визуализирует большее количество волокон в острый период травмы (в) и в динамике (г) в отличие от FACT (а, б)

макроуровне. Воксели имеют толщину 1 мм, тогда как диаметр аксона – микрон. При помощи данного метода невозмож-

но отличить афферентные пучки от эфферентных. Более того, предположение об однородных однонаправленных

тензорах нереально, потому что многие области мозга содержат более одного пучка пересекающихся волокон. Пересекающиеся и расходящиеся волокна приводят к неверным оценкам направления, и их реконструкция невозможна.

В исследование Захаровой Н. Е. и соавт. (2010) [3] были включены 14 пациентов с тяжелым ДАП (ШКТ ≤ 8 в остром периоде) на 3–17-е сутки после ЧМТ. Динамические ДТ МРТ этим пациентам были выполнены с 3-й до 33-й недели после травматического повреждения. Спустя 3 месяца после ЧМТ оценивались исходы у пациентов по шкале исходов Глазго. В результате исследования трактография показала нарастание асимметрии кортикоспинальных трактов и почти полное отсутствие визуализации восходящих волокон мозолистого тела через 3–20 недель после травмы у 5 пациентов с неблагоприятными исходами. Частичная потеря и истончение волокон мозолистого тела отмечались у 6 пациентов. У 2 пациентов с хорошим восстановлением и умеренной инвалидизацией при динамических исследованиях не отмечалось грубых изменений структуры мозолистого тела. Авторы исследования пришли к выводу, что показатели ФА достоверно отражают степень интегрированности проводящих волокон белого вещества мозга, а использование ДТ МРТ позволяет выявлять качественные и количественные изменения трактов белого вещества мозга и оценивать их клиническое и прогностическое значение при ДАП [2, 3].

Оценка негауссовской характеристики диффузии в головном мозге возможна при помощи более сложных методов исследования, например, ДК МРТ. Впервые использовать куртозис для описания

диффузионных свойств биологической ткани было предложено Jensen et al. в 2005 году [12]. Диффузионный куртозис получается путем разложения в ряд Тейлора спада диффузионного сигнала по гауссовой модели. Таким образом можно получить новые параметры, характеризующие структурные изменения в веществе мозга. Идея использовать куртозисное разложение вместо обычной гауссовой диффузионной модели возникла потому, что в ряде случаев классическая гауссова модель показывала свою несостоятельность. По мнению авторов, модель куртозиса, позволяющая описать негауссовую диффузию, оказалась перспективной в изучении белого вещества головного мозга.

ДК МРТ позволяет оценить изотропные структуры (не имеющие направления), включая кору и базальные ганглии, а также дает возможность реконструировать пересекающиеся волокна белого вещества, что является важным ограничением ДТ МРТ. Одним из алгоритмов реконструкции трактов является HARDI-CSD (high angular resolution diffusion imaging – constrained spherical deconvolution).

HARDI-CSD трактография — это вероятностный метод с использованием разложения по сферическим функциям с высоким угловым разрешением, который позволяет преодолеть недостатки FACT-алгоритма. HARDI-CSD позволяет визуализировать состояние проводящих путей головного мозга при различных патологических процессах, провести количественную оценку проводящих путей (определение плотности нервных волокон в тракте, площади поперечного сечения тракта). Данная модель является наиболее точной из существующих в настоящее время (рис. 2).

В ряде исследований с помощью ДК МРТ изучались патоморфологические изменения в головном мозге после ЧМТ [11, 20]. В исследовании Zhuo et al. (2012) [20] на крысах было показано, что средний куртозис позволяет определить изменения в микроструктуре белого и серого вещества мозга во время подострого периода ЧМТ, что было подтверждено гистологически [20]. В работе Grossman et al. (2013) [11], исследовавших пациентов с легкой ЧМТ, было выявлено статистически значимое снижение среднего куртозиса в таламусе в группе пациентов с нарушением когнитивных функций по сравнению с контрольной группой здоровых добровольцев. Считается, что средний куртозис в целом отображает гетерогенность микроструктуры мозга.

В исследовании Захаровой Н. Е. и соавт. (2019) [4] впервые были изучены параметры диффузионно-куртозисной МРТ у пациентов с тяжелым ДАП. 12 пациентам с тяжелым ДАП была выполнена ДК МРТ (11 в коме, 1 в сопоре) и 8 здоровым добровольцам (контрольная группа). Первые МРТ-исследования пациентам выполнены на 5–19-е сутки после травматического повреждения. Динамическое исследование было проведено 7 пациентам. Были получены параметры для серого (средний, аксиальный и радиальный куртозис, куртозисная анизотропия) и белого вещества (ФА, фракция аксональной воды, аксиальная и радиальная экстрааксональная диффузия и извитость экстрааксонального пространства). Области интереса были выделены в проекции семиовальных центров, колоне и валике мозолистого тела, переднем и заднем бедре внутренней капсулы, скорлупе, таламусе, на уровне среднего мозга и моста. Результаты

исследования показали, что имеются обширные изменения как белого, так и серого вещества мозга в остром периоде ЧМТ. По мнению авторов, ДК МРТ дает новую информацию о патологических процессах при ДАП, что углубляет понимание патофизиологии травмы мозга. Новые параметры смогут стать биомаркерами повреждения мозга, а также возможными предикторами исходов [4].

В недавнем исследовании Stenberg et al. (2021) [17] оценивалась связь между показателями ДТ МРТ, ДК МРТ и стойкими посттравматическими симптомами (соматические, эмоциональные, когнитивные расстройства и нарушение сна) через 3 месяца после легкой ЧМТ. Пациентам была выполнена МРТ в течение 72 часов после травмы. Пациенты со стойкими посттравматическими симптомами имели более низкую ФА при ДТ МРТ (в 2,7 % всех вокселей) и ДК МРТ (в 6,9 % всех вокселей), а также более высокий радиальный коэффициент диффузии (в 0,3 % всех вокселей), чем пациенты без стойких посттравматических симптомов. Пациенты, у которых позже развились стойкие посттравматические расстройства, имели худшую микроструктурную целостность белого вещества в острой фазе, чем здоровые добровольцы из контрольной группы и пациенты без стойких посттравматических симптомов. Таким образом, авторы предполагают, что определенные характеристики белого вещества мозга могут служить биомаркерами неблагоприятного исхода после легкой ЧМТ.

В свою очередь, у ДК МРТ есть несколько ограничений. Во-первых, относительно долгое время получения изображения по сравнению со временем получения изображения для ДТ МРТ: для оценки тензора диффузии и кур-

тозиса необходимо получить минимум два ненулевых значения b и не менее 15 направлений диффузии. Длительное время получения изображения увеличивает восприимчивость к движению пациента. Еще одно ограничение ДК МРТ состоит в том, что модель более сложная (21 независимый параметр), чем ДТ МРТ (6 независимых параметров). Когда используется короткий протокол исследования, параметры ДК МРТ могут быть переменными и имеется вариабельность по областям мозга, поэтому следует уделять внимание правильному дизайну исследования. Более того, точное значение параметров среднего, аксиального, радиального куртозиса и других параметров все еще исследуется. Требуется дополнительные исследования для оценки взаимосвязии изменений параметров ДК МРТ с патологическими данными.

Выводы

Черепно-мозговая травма остается одной из основных проблем здравоохранения во всем мире. Включение в протокол исследования таких методов, как ДТ МРТ и ДК МРТ, позволяет получить дополнительную информацию о целостности вещества и распространности поражения головного мозга, которая не всегда определяется на обзорной МРТ, особенно при диффузных аксональных повреждениях. Также есть перспективы этих методов в прогнозировании клинических исходов у пациентов с ЧМТ.

Список литературы

1. Баев А. А., Погосбекян Э. Л., Захарова Н. Е. и др. Магнитно-резонансная трактография на основе вероятностных алгоритмов разложения по сферическим

функциям у пациентов с глиомами зрительных путей // Альманах клинической медицины. 2021. Т. 49. № 1. С. 11–20.

2. Захарова Н. Е., Потапов А. А., Корниенко В. Н. и др. Оценка состояния проводящих путей головного мозга при диффузных аксональных повреждениях с помощью диффузионно-тензорной магнитно-резонансной томографии // «Вопросы нейрохирургии» имени Н. Н. Бурденко. 2010. Т. 2. С. 3–9.
3. 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» имени Н. Н. Бурденко. 2010. Т. 3. С. 3–9.
4. Захарова Н. Е., Потапов А. А., Пронин И. Н. и др. Изменения параметров диффузионно-куртозисной МРТ у пациентов с диффузным аксональным повреждением // «Вопросы нейрохирургии» имени Н. Н. Бурденко. 2019. Т. 3. С. 5–16.
5. Погосбекян Э. Л., Туркин А. М., Баев А. А. и др. Диффузионно-куртозисная МРТ в оценке микроструктуры вещества головного мозга. Результаты исследований здоровых добровольцев // Медицинская визуализация. 2018. № 4. С. 108–126.
6. Потапов А. А., Лихтерман Л. Б., Касимова С. Ю. и др. Диффузные аксональные повреждения головного мозга // «Вопросы нейрохирургии» имени Н. Н. Бурденко. 1990. Т. 2. С. 3–7.
7. Chu Z., Wilde E., Hunter J. et al. Voxel-based analysis of diffusion tensor imaging in mild traumatic brain injury in adolescents. AJNR Am. J. Neuroradiol. 2010. V. 31. № 2. P. 340–346.

8. Edlow B., Copen W., Izzy S. et al. Diffusion tensor imaging in acute-to-subacute traumatic brain injury: a longitudinal analysis. *BMC Neurol.* 2016. V. 16. № 2.
9. Garin-Muga A., Borro D. Review and challenges of brain analysis through DTI measurements. *Stud Health Technol Inform.* 2014. V. 207. P. 27–36.
10. Greve M., Zink B. Pathophysiology of traumatic brain injury. *Mt Sinai J Med.* 2009. V. 76. № 2. P. 97–104.
11. Grossman E. J., Jensen J. H., Babb J. S. et al. Cognitive impairment in mild traumatic brain injury: a longitudinal diffusional kurtosis and perfusion imaging study. *AJNR.* 2013. V. 34. № 5. P. 951–957.
12. Jensen J., Helpert J., Ramani A. et al. Diffusional kurtosis imaging: The quantification of non Gaussian water diffusion by means of magnetic resonance imaging. *Magnetic resonance in medicine.* 2005. V. 53. № 6. P. 1432–1440.
13. Jones D., Knösche T., Turner R. White matter integrity, fiber count, and other fallacies: the do's and don'ts of diffusion MRI. *Neuroimage.* 2013. V. 73. P. 239–254.
14. Lipton M., Gellella E., Lo C. et al. Multifocal white matter ultrastructural abnormalities in mild traumatic brain injury with cognitive disability: a voxel-wise analysis of diffusion tensor imaging. *J. Neurotrauma.* 2008. V. 25. № 11. P. 1335–1342.
15. Mac Donald C., Dikranian K. et al. Diffusion tensor imaging reliably detects experimental traumatic axonal injury and indicates approximate time of injury. *J. Neurosci.* 2007. V. 27. № 44. P. 11869–11876.
16. Meythaler J., Peduzzi J., Eleftheriou E. et al. Current concepts: diffuse axonal injury-associated traumatic brain injury. *Arch Phys Med Rehabil.* 2001. V. 82. № 10. P. 1461–1471.
17. Stenberg J., Eikenes L., Moen K. et al. Acute Diffusion Tensor and Kurtosis Imaging and Outcome following Mild Traumatic Brain Injury. *J. Neurotrauma.* 2021. V. 38. № 18. P. 2560–2571.
18. Xu J., Rasmussen I., Lagopoulos J. et al. Diffuse axonal injury in severe traumatic brain injury visualized using high-resolution diffusion tensor imaging. *J. Neurotrauma.* 2007. V. 24. № 5. P. 753–765.
19. Zakharova N., Kornienko V., Potapov A., Pronin I. Neuroimaging of traumatic brain injury. Cham Heidelberg New York Dordrecht London: Springer. 2014.
20. Zhuo J., Xu S., Proctor J. et al. Diffusion kurtosis as an in vivo imaging marker for reactive astrogliosis in traumatic brain injury. *Neuroimage.* 2012. V. 59. № 1. P. 467–477.

References

1. Баев А. А., Погосбекьян Е. Л., Захарова Н. Е. et al. Magnetic resonance tractography based on the constrained spherical deconvolution in patients with gliomas of the optic pathway. *Almanac of Clinical Medicine.* 2021. V. 49. No. 1. P. 11–20 (in Russian).
2. Захарова Н. Е., Потопов А. А., Корниенко В. Н. et al. Assessment of brain pathways in diffuse axonal injury using diffusion-tensor MRI. *Voprosy neurokhirurgii.* 2010. V. 2. P. 3–9 (in Russian).
3. Захарова Н. Е., Потопов А. А., Корниенко В. Н. et al. Dynamic assessment of corpus callosum and corticospinal tracts structure using diffusion-tensor MRI in diffuse axonal injury. *Voprosy neurokhirurgii.* 2010. V. 3. P. 3–9 (in Russian).
4. Захарова Н. Е., Потопов А. А., Пронин И. Н. et al. Diffusion kurtosis imaging in diffuse axonal injury. *Zhurnal Voprosy Neurokhirurgii Imeni N. N. Burdenko.* 2019. V. 3. P. 5–16 (in Russian).

5. *Pogosbekyan E. L., Turkin A. M., Baev A. A. et al.* Diffusion-kurtosis imaging in assesment of brain microstructure. Healthy volunteers measurments. Medical Visualization. 2018. V. 4. P. 108–126 (in Russian).
6. *Potapov A. A., Lichterman L. B., Kasumova S. Yu. et al.* Diffuse axonal injury of the brain. Voprosy neirokhirurgii. 1990. V. 2. P. 3–7 (in Russian).
7. *Chu Z., Wilde E., Hunter J. et al.* Voxel-based analysis of diffusion tensor imaging in mild traumatic brain injury in adolescents. AJNR Am. J. Neuroradiol. 2010. V. 31. No. 2. P. 340–346.
8. *Edlow B., Copen W., Izzy S. et al.* Diffusion tensor imaging in acute-to-subacute traumatic brain injury: a longitudinal analysis. BMC Neurol. 2016. V. 16. No. 2.
9. *Garin-Muga A., Borro D.* Review and challenges of brain analysis through DTI measurements. Stud. Health Technol. Inform. 2014. V. 207. P. 27–36.
10. *Greve M., Zink B.* Pathophysiology of traumatic brain injury. Mt Sinai J. Med. 2009. V. 76. No. 2. P. 97–104.
11. *Grossman E. J., Jensen J. H., Babb J. S. et al.* Cognitive impairment in mild traumatic brain injury: a longitudinal diffusional kurtosis and perfusion imaging study. AJNR. 2013. V. 34. No. 5. P. 951–957.
12. *Jensen J., Helpers J., Ramani A. et al.* Diffusional kurtosis imaging: The quantification of non Gaussian water diffusion by means of magnetic resonance imaging. Magnetic resonance in medicine. 2005. V. 53. No. 6. P. 1432–1440.
13. *Jones D., Knösche T., Turner R.* White matter integrity, fiber count, and other fallacies: the do's and don'ts of diffusion MRI. Neuroimage. 2013. V. 73. P. 239–254.
14. *Lipton M., Gellella E., Lo C. et al.* Multifocal white matter ultrastructural abnormalities in mild traumatic brain injury with cognitive disability: a voxel-wise analysis of diffusion tensor imaging. J. Neurotrauma. 2008. V. 25. No. 11. P. 1335–1342.
15. *Mac Donald C., Dikranian K. et al.* Diffusion tensor imaging reliably detects experimental traumatic axonal injury and indicates approximate time of injury. J. Neurosci. 2007. V. 27. No. 44. P. 11869–11876.
16. *Meythaler J., Peduzzi J., Eleftheriou E. et al.* Current concepts: diffuse axonal injury-associated traumatic brain injury. Arch. Phys. Med. Rehabil. 2001. V. 82. No. 10. P. 1461–1471.
17. *Stenberg J., Eikenes L., Moen K. et al.* Acute Diffusion Tensor and Kurtosis Imaging and Outcome following Mild Traumatic Brain Injury. J. Neurotrauma. 2021. V. 38. No. 18. P. 2560–2571.
18. *Xu J., Rasmussen I., Lagopoulos J. et al.* Diffuse axonal injury in severe traumatic brain injury visualized using high-resolution diffusion tensor imaging. J. Neurotrauma. 2007. V. 24. No. 5. P. 753–765.
19. *Zakharova N., Kornienko V., Potapov A., Pronin I.* Neuroimaging of traumatic brain injury. Cham Heidelberg New York Dordrecht London: Springer. 2014.
20. *Zhuo J., Xu S., Proctor J. et al.* Diffusion kurtosis as an in vivo imaging marker for reactive astrogliosis in traumatic brain injury. Neuroimage. 2012. V. 59. No. 1. P. 467–477.

Сведения об авторах

Афандиев Рамин Малик оглы, аспирант отделения рентгеновских и радиоизотопных методов диагностики ФГАУ «НМИЦ нейрохирургии им. академика Н. Н. Бурденко» Минздрава России.

Адрес: 125047, г. Москва, ул. 4-я Тверская-Ямская, д. 16.

Тел.: +7 (919) 999-88-21. Электронная почта: rafandiev@nsi.ru

ORCID.org/0000-0001-6384-7960

Вклад автора: разработка концепции – формирование идеи, цели и написание текста.

Afandiev Ramin Malik ogly, Postgraduate of Department of X-ray and Radioisotope Diagnostic methods, N. N. Burdenko National Medical Research Center of Neurosurgery, Ministry of Healthcare of Russia.

Address: 16, ul. Tverskaya-Yamskaya, Moscow, 125047, Russia.

Phone number: +7 (919) 999-88-21. E-mail: rafandiev@nsi.ru

ORCID.org/0000-0001-6384-7960

Author's contribution: concept development – formation of an idea, goals and writing a text.

Захарова Наталья Евгеньевна, доктор медицинских наук, профессор РАН, ведущий научный сотрудник отделения рентгеновских и радиоизотопных методов диагностики ФГАУ «НМИЦ нейрохирургии им. академика Н. Н. Бурденко» Минздрава России.

Адрес: 125047, г. Москва, ул. 4-я Тверская-Ямская, д. 16.

Электронная почта: nzakharova@nsi.ru

ORCID.org/0000-0002-0516-3613

Вклад автора: утверждение окончательного варианта публикации – принятие ответственности за все аспекты работы, целостность всех частей статьи и ее окончательный вариант.

Zakharova Natalia Evgen'evna, M. D. Med., Professor of the Russian Academy of Sciences, Leading Research Fellow, Department of X-ray and Radioisotope Diagnostic Methods, N. N. Burdenko National Medical Research Center of Neurosurgery, Ministry of Healthcare of Russia.

Address: 16, ul. Tverskaya-Yamskaya, Moscow, 125047, Russia.

E-mail: nzakharova@nsi.ru

ORCID.org/0000-0002-0516-3613

Author's contribution: approval of the final version of the publication – taking responsibility for all aspects of the work, the integrity of all parts of the article and its final version.

Погосбекян Эдуард Леонидович, медицинский физик отделения рентгеновских и радиоизотопных методов диагностики ФГАУ «НМИЦ нейрохирургии им. академика Н. Н. Бурденко» Минздрава России.

Адрес: 125047, г. Москва, ул. 4-я Тверская-Ямская, д. 16.

Электронная почта: epogosbekyan@nsi.ru

ORCID.org/0000-0002-4803-6948

Вклад автора: утверждение окончательного варианта публикации – принятие ответственности за все аспекты работы, целостность всех частей статьи и ее окончательный вариант.

Pogosbekyan Eduard Leonidovich, Medical Physicist of Department of X-ray and Radioisotope Diagnostic methods, N. N. Burdenko National Medical Research Center of Neurosurgery, Ministry of Healthcare of Russia.

Address: 16, ul. Tverskaya-Yamskaya, Moscow, 125047, Russia.

E-mail: epogosbekyan@nsi.ru

ORCID.org/0000-0002-4803-6948

Author's contribution: approval of the final version of the publication – taking responsibility for all aspects of the work, the integrity of all parts of the article and its final version.

Потапов Александр Александрович, доктор медицинских наук, профессор, академик РАН, ФГАУ «НМИЦ нейрохирургии им. академика Н. Н. Бурденко» Минздрава России.

Адрес: 125047, г. Москва, ул. 4-я Тверская-Ямская, д. 16.

ORCID.org/0000-0001-8343-3511

Вклад автора: утверждение окончательного варианта публикации – принятие ответственности за все аспекты работы, целостность всех частей статьи и ее окончательный вариант.

Potapov Alexandr Alexandrovich, M. D. Med., Professor, Academician of the Russian Academy of Sciences, N. N. Burdenko National Medical Research Center of Neurosurgery, Ministry of Healthcare of Russia.

Address: 16, ul. Tverskaya-Yamskaya, Moscow, 125047, Russia.

ORCID.org/0000-0001-8343-3511

Author's contribution: approval of the final version of the publication – taking responsibility for all aspects of the work, the integrity of all parts of the article and its final version.

Пронин Игорь Николаевич, доктор медицинских наук, профессор, академик РАН, заведующий отделением рентгеновских и радиоизотопных методов диагностики ФГАУ «НМИЦ нейрохирургии им. академика Н. Н. Бурденко» Минздрава России.

Адрес: 125047, г. Москва, ул. 4-я Тверская-Ямская, д. 16.

Электронная почта: pronin@nsi.ru

ORCID.org/0000-0002-4480-0275

Вклад автора: утверждение окончательного варианта публикации – принятие ответственности за все аспекты работы, целостность всех частей статьи и ее окончательный вариант.

Pronin Igor` Nikolaevich, M. D. Med., Professor, Academician of the Russian Academy of Sciences, Head of Department of X-ray and Radioisotope Diagnostic Methods, N. N. Burdenko National Medical Research Center of Neurosurgery, Ministry of Healthcare of Russia.

Address: 16, ul. Tverskaya-Yamskaya, Moscow, 125047, Russia.

E-mail: pronin@nsi.ru

ORCID.org/0000-0002-4480-0275

Author's contribution: approval of the final version of the publication – taking responsibility for all aspects of the work, the integrity of all parts of the article and its final version.

Дата поступления статьи в редакцию издания: 26.11.2021 г.

Дата одобрения после рецензирования: 27.11.2021 г.

Дата принятия статьи к публикации: 28.11.2021 г.