

УДК 616.831-005.1-005.4-073.756.8
<https://doi.org/10.20538/1682-0363-2026-2-150-160>

Мультимодальная магнитно-резонансная томография головного мозга в оценке реабилитационного потенциала у пациентов после перенесенного ишемического инсульта

Куражов А.П.¹, Алифирова В.М.¹, Королёва Е.С.¹, Дегтярев И.Ю.¹, Лойко Ю.Н.²,
Кучерова К.С.¹, Суханова К.С.¹, Завадовская В.Д.¹

¹ Сибирский государственный медицинский университет (СибГМУ)
Россия, 634050, г. Томск, Московский тракт, 2

² Лечебно-диагностический центр (ЛДЦ) Медицинского института им. Березина Сергея (МИБС)
Россия, 634063, г. Томск, ул. Мичурина, 105

РЕЗЮМЕ

Острые нарушения мозгового кровообращения являются важной медико-социальной проблемой как в мире, так и в Российской Федерации, что обусловлено высокими показателями заболеваемости, смертности и инвалидизации. Основу разработки инновационных подходов ускоренной реабилитации лиц после перенесенного ишемического инсульта составляет исследование нейропластичности с использованием методов современной нейровизуализации, таких как мультимодальная магнитно-резонансная томография (МРТ).

Представлен обзор литературы, в котором рассматриваются диагностические возможности различных компонентов мультипараметрической МРТ, таких как функциональная МРТ, ASL-MPT и диффузионно-тензорная МРТ, включая их потенциальные преимущества и недостатки применительно к оценке реабилитационного потенциала у пациентов после перенесенного ишемического инсульта. Показано, что данные компоненты мультипараметрической МРТ могут быть успешно использованы для изучения механизмов нейропластичности и определения ответа на терапию в ходе реабилитационных мероприятий у пациентов после ишемического инсульта. Обозначены проблемные аспекты активного внедрения мультипараметрической МРТ в широкую клиническую практику, главными из которых являются отсутствие глубоких знаний о диагностических возможностях того или иного компонента данной технологии в конкретной клинической ситуации, сложность ее использования и недостаточная емкость доказательной научной базы.

Ключевые слова: ишемический инсульт, мультимодальная магнитно-резонансная томография, нейропластичность, реабилитация

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Источник финансирования. Авторы заявляют об отсутствии источника финансирования при проведении исследования.

Для цитирования: Куражов А.П., Алифирова В.М., Королёва Е.С., Дегтярев И.Ю., Лойко Ю.Н., Кучерова К.С., Суханова К.С., Завадовская В.Д. Мультимодальная магнитно-резонансная томография головного мозга в оценке реабилитационного потенциала у пациентов после перенесенного ишемического инсульта. *Бюллетень сибирской медицины*. 2026;25(2):150–160. <https://doi.org/10.20538/1682-0363-2026-2-150-160>.

Multimodal magnetic resonance imaging of the brain at different stages of rehabilitation after ischemic stroke

Kurazhov A.P.¹, Alifirova V.M.¹, Koroleva E.S.¹, Degtyarev I.Yu.¹, Loiko Yu.N.², Kucherova K.S.¹, Sukhanova K.S.¹, Zavadovskaya V.D.¹

¹ Siberian State Medical University

² Moscovsky trakt, 634050 Tomsk, Russian Federation

² Treatment and Diagnostic Center, Dr. Berezin Medical Institute

105 Michurin St., 634063 Tomsk, Russian Federation

ABSTRACT

Stroke is an important medical and social problem in the world and in the Russian Federation, which is due to high rates of morbidity, mortality, and disability. The basis for the development of innovative approaches to the accelerated rehabilitation of individuals after an ischemic stroke is the study of neuroplasticity using modern neuroimaging methods, such as multimodal magnetic resonance imaging (MRI).

The present literature review describes diagnostic capabilities of different multimodal MRI modalities, such as functional MRI (fMRI), ASL MR perfusion, and diffusion tensor MRI, including their advantages and drawbacks in assessing rehabilitation potential of patients after ischemic stroke. These MRI modalities can be successfully utilized to study the mechanisms of neuroplasticity and identify reliable markers of a response to therapy in context of rehabilitation measures in stroke patients.

It was shown that broad implementation of multimodal MRI in clinical practice is hindered by a lack of profound knowledge about its diagnostic capabilities in certain clinical settings, complexity of its use, and insufficient evidence base.

Keywords: acute cerebrovascular accident, functional magnetic resonance imaging, neuroplasticity, rehabilitation

Conflict of interest. The authors declare the absence of obvious or potential conflicts of interest related to the publication of this article.

Source of financing. The authors state that they received no funding for the study.

For citation: Kurazhov A.P., Alifirova V.M., Koroleva E.S., Degtyarev I.Yu., Loiko Yu.N., Kucherova K.S., Sukhanova K.S., Zavadovskaya V.D. Multimodal magnetic resonance imaging of the brain at different stages of rehabilitation after ischemic stroke. *Bulletin of Siberian Medicine*. 2026;25(2):150–160. <https://doi.org/10.20538/1682-0363-2026-2-150-160>.

ВВЕДЕНИЕ

Сосудистые заболевания головного мозга представляют собой огромную медико-социальную проблему современного общества. Острые нарушения мозгового кровообращения (ОНМК) занимают лидирующие позиции среди заболеваний нервной системы как в мире в целом, так и в Российской Федерации, являясь ведущей причиной смертности и тяжёлой инвалидизации пациентов. Ежегодно в России регистрируется более 450 тыс. новых случаев инсульта, а ежегодная смертность от инсульта составляет 374 случая на 100 тыс. населения. При этом в острый период инсульта, длящийся 28 сут с момента его клинической манифестации, летальность достигает 35%, однако в течение последующего года она увеличивается еще на 15% [1–3].

Первичная утрата трудоспособности у лиц, перенесших острую церебральную ишемию, по данным различных авторов, достигает 40% [4, 5]. Таким образом, проблема совершенствования медицинской помощи пациентам с данным заболеванием находится в числе наиболее актуальных научно-практических проблем современной медицины. Вместе с тем своевременно начатая реабилитация и многосторонняя оценка анатомических и функциональных изменений в ткани головного мозга пациентов, перенесших ОНМК, позволяет уменьшить тяжесть неврологического дефицита и улучшить их социально-бытовую адаптацию [6].

Согласно современным представлениям, неврологический дефицит у пациентов с инсультом головного мозга обусловлен как необратимыми очаговыми повреждениями ткани мозга, развивающимися в

рамках инфаркта, так и изменениями в периинфарктных зонах в виде структурных и функциональных нарушений проводящих путей. При этом степень поражения проводящих путей головного мозга является более сильным предиктором исходов лечения пациентов и восстановления их функционального статуса по сравнению с размерами очага инфаркта или исходным функциональным статусом. Это обусловлено тем, что в ответ на повреждение в головном мозге человека начинают активизироваться процессы его структурной перестройки и функциональной реорганизации, касающиеся, прежде всего, проводящих путей [7].

Научные достижения последних десятилетий свидетельствуют о том, что ключевую роль в процессах восстановления ткани головного мозга после острой церебральной ишемии играют механизмы нейропластичности [6, 8]. Нейропластичность — это способность различных отделов центральной нервной системы к структурной и функциональной реорганизации, в том числе к качественным и количественным нейрональным перестройкам, изменениям нейрональных связей и глиальных элементов, позволяющим реализовывать адаптивные ответы [9, 10].

Высоким уровнем нейропластичности обладает кора головного мозга. Восстановление моторных, сенсорных и когнитивных функций у пациентов после ишемического инсульта в значительной степени связано именно с реорганизацией нейронных сетей, а также с изменениями в силе и количестве образующихся синаптических связей [11]. Эта реорганизация была впервые показана еще в 1991 г. при выполнении позитронной эмиссионной томографии (ПЭТ). В дальнейшем с помощью ПЭТ и функциональной магнитно-резонансной томографии (фМРТ) были неоднократно продемонстрированы изменения в обоих полушариях головного мозга на всех стадиях ОНМК, обусловленные нейропластичностью [12].

Наряду с функциональной пластичностью, подразумевающей восстановление определенных функциональных возможностей ткани головного мозга, особенный интерес представляет структурная нейропластичность. Она обусловлена тем, что аксональная дегенерация в областях, структурно связанных с участком поражения, является триггером для развития новых синапсов с денервированными нейронами, что, вероятно, обуславливает восстановление моторных функций у пациентов. Несмотря на прогресс в изучении нейропластичности, соотношения и взаимосвязи между функциональной реорганизацией и структурными изменениями, протекающими в центральной нервной системе после ОНМК, все еще до конца не изучены [13]. Вместе с тем глубокое

понимание механизмов нейропластичности проводящих путей головного мозга в будущем позволит прогнозировать исход ишемического инсульта и эффективность реабилитационных мероприятий у каждого конкретного больного.

Несмотря на то, что в настоящее время значение структурной целостности проводящих путей головного мозга в процессе восстановления двигательных функций после ОНМК остается во многом не ясным и недостаточно освещенным в отечественной и зарубежной литературе, в последние годы все большее внимание исследователей начал привлекать поиск маркеров структурно-функционального состояния проводящих путей головного мозга, способных выступать в роли индикаторов реабилитационного потенциала пациентов, перенесших ишемический инсульт.

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ НЕЙРОВИЗУАЛИЗАЦИИ ПОСЛЕДСТВИЙ ИШЕМИЧЕСКОГО ИНСУЛЬТА

Использование современных методов нейровизуализации позволяет получать широкий спектр диагностической информации, необходимой для оценки состояния мозговой ткани на различных этапах ОНМК, включающий определение ее жизнеспособности, прогнозирование рисков геморрагической трансформации ишемического инсульта, а также естественную эволюцию нейропластичности, нейродегенерации и процессов диашизиса, викариации и растормаживания [5, 8]. Также на основе методов нейровизуализации созданы и используются прогностические модели, позволяющие предсказывать эффективность результатов лечения ОНМК и определять реабилитационный потенциал у пациентов, перенесших ишемический инсульт.

На сегодняшний день приоритетные позиции в решении вышеперечисленных задач принадлежат МРТ. Эволюция данного метода — от МРТ-ангиографии сосудов головного мозга (включая ангиографию с контрастным усилением) до МР-исследований тканевой перфузии с помощью эндогенных (ASL (Arterial spin labeling), BOLD (Blood oxygenation level dependent)) и экзогенных маркеров (препараты гадолиния), а также методик с получением диффузионно-взвешенных изображений (ДВИ), ADC (Apparent diffusion coefficient), трактографии, спектроскопии и исследований с функциональными пробами — позволила значительно повысить его диагностический потенциал [14].

Другим достоинством МРТ является возможность проведения многократных исследований всего головного мозга, что делает ее идеальной модаль-

ностью для исследований нейропластичности на уровне связанных нейронных проводящих путей на большом протяжении [15]. В настоящее время структурные и функциональные изменения после инсульта широко исследуются с помощью фМРТ, диффузионно-тензорной МРТ (ДТ-МРТ) [12] и МРТ с контрастированием. Вместе с тем разрозненное использование современных МР-технологий не позволяет всесторонне изучать структурные и функциональные изменения в головном мозге у больных после перенесенного ишемического инсульта, в связи с чем в последнее время в большинстве исследований используется комплексный подход с привлечением различных МР-модальностей.

В связи с этим на сегодняшний день именно мультимодальная МР-диагностика приобретает ведущее значение в оценке состояния головного мозга у пациентов после перенесенного ОНМК [16–19], поскольку с помощью данного подхода возможно получение огромного количества информации о тяжести и стадии инсульта [16]. Так, по мнению К. Atchaneeyasakul и соавт. [20], мультимодальная МРТ благодаря более точной идентификации поражения головного мозга после инсульта и отличному пространственному разрешению остается наиболее оптимальным методом оценки морфофункционального состояния головного мозга у пациентов с острым ишемическим инсультом.

В других исследованиях было показано, что от результатов мультимодальной МРТ могут зависеть исходы тромболитической и эндоваскулярной терапии у пациентов с подтипом ишемического инсульта, при котором перед сном не выявляется никакой неврологической симптоматики, а после пробуждения определяется неврологический дефицит. Более того, возможно, что именно мультимодальная МРТ станет лучшим методом нейровизуализации, дающим необходимую информацию для принятия решения о стратегиях лечения ишемического инсульта.

Исходя из этого, на основе результатов мультимодальной МРТ в 2020 г. Н. Lee и соавт. [21] разработали и представили полностью автоматизированный алгоритм сегментации основных зон ишемического инсульта, показав, что данный алгоритм, обеспечивающий быструю и надежную обработку клинической информации, может быть использован для принятия решения о применении или отказе от реперфузионной терапии. Все это свидетельствует о том, что мультимодальная МРТ может явиться одним из лучших лучевых методов определения реабилитационного потенциала у пациентов, перенесших ишемический инсульт, и может активно влиять на стратегию и тактику их лечения [7, 16].

ВОЗМОЖНОСТИ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ МРТ

Функциональная МРТ – это неинвазивный метод нейровизуализации, используемый для обнаружения изменений биоактивности различных мозговых структур. Функциональная МРТ основана на регистрации различий в магнитных свойствах оксигемоглобина и дезоксигемоглобина, соотношения которых в мозговом веществе изменяются в зависимости от локальных изменений кровотока, вызванного нейрональной активностью. Таким образом, на построение фМР-томограмм оказывает влияние зависимость МР-сигнала от степени насыщенности мозгового вещества кислородом крови (blood oxygenation level dependent, BOLD). Когда нейроны какой-либо области мозга становятся активными, кровоток в ней увеличивается для удовлетворения повышенной потребности функционирующих нейронов в кислороде. Это позволяет регистрировать и количественно оценивать нейрональную активность в ответ на какой-либо стимул, используя BOLD-феномен в качестве показателя нейрональной активности.

Поскольку фМРТ не несет лучевой нагрузки, не требует введения контрастных веществ, является неинвазивной и в настоящее время признана одним из оптимальных лучевых методов оценки структурно-функционального состояния проводящих путей головного мозга, она представляет собой идеальную лучевую модальность для клинических исследований ишемического инсульта и его последствий [11]. Измерения, проводимые в рамках фМРТ, могут предоставлять качественную и количественную информацию о состоянии оставшихся после инсульта нейронов, находящихся в процессе восстановления, включая динамический мониторинг степени активации различных зон коры головного мозга и изменения их объема [15].

Такого же мнения придерживаются и Х. Хiao и соавт. [22] и J. Lui и соавт. [23], которые считают, что фМРТ является перспективным методом количественной оценки предикторов восстановления головного мозга после ишемического инсульта. Это подтверждается результатами работы С. W. Wu и соавт. [24], которые, исследуя пациентов после ишемического инсульта с помощью фМРТ, определили, что состояние их основных проводящих путей в значительной степени обуславливает успешность их реабилитации и в дальнейшем может служить нейрореабилитационным индикатором эффективности проведенного лечения.

Во многих других современных исследованиях также показан высокий потенциал фМРТ, используемой в совокупности с другими диагностическими

подходами, в прогнозировании исходов ишемического инсульта. Так, по результатам J. Du и соавт. [25], прогностическая модель, включающая результаты фМРТ, проведенной на ранних этапах ОНМК, позволила в долгосрочной перспективе прогнозировать степень восстановления двигательной активности после ишемического инсульта. При этом лучший результат восстановления моторных функций статистически значимо коррелировал с меньшими начальными моторными нарушениями, меньшей степенью повреждения кортикоспинального тракта (КСТ), начальным присутствием моторно-вызванных потенциалов, а также более сильной исходной активацией моторной коры.

Включение данных фМРТ в многофакторный анализ улучшало точность прогнозирования исходов ишемического инсульта по сравнению только с клиническими и нейрофизиологическими оценками [25]. Это объяснимо тем, что первоначально для компенсации функции пораженной области головного мозга во время его восстановления активируются новые проводящие пути, что по данным фМРТ проявляется повышением МР-сигнала, интенсивность которого зависит от степени насыщения крови кислородом (BOLD). При этом у пациентов после ишемического инсульта во время выполнения задачи обычно наблюдается более сильное повышение МР-сигнала в зоне интереса, чем в контрольной группе, представленной здоровыми добровольцами. Впоследствии интенсивность МР-сигнала в зоне интереса снижается до базового уровня, поскольку проводящие пути становятся более эффективными, как и в процессе обучения, обычно наблюдаемом во время развития головного мозга в норме [11].

Немалый интерес для современной клинической неврологии представляют новые научные данные, полученные с помощью фМРТ, о динамике восстановления моторных функций у пациентов после ишемического инсульта. По результатам этих исследований было установлено, что в течение 24 ч после ишемического инсульта в ЦНС появляется реорганизованная моторная сеть, позволяющая обойти поврежденные проводящие пути посредством активации альтернативных путей. Было показано, что реорганизация поврежденного полушария и восстановление нейрональной активности вокруг зоны поражения являются следующим важным этапом реабилитации, на котором поддерживается активность этих новых, но менее эффективных связей [11]. Также и в другом исследовании на основании результатов фМРТ, проведенной пациентам после ОНМК, были показаны динамические изменения нейрональной активности в зонах головного мозга,

смежных с областями инфаркта. Таким образом, и реабилитационные мероприятия должны быть направлены на интенсификацию активации данных зон, в которых идут процессы функциональной реорганизации [7].

В ряде исследований с использованием фМРТ их авторы описывают прогрессирование восстановления двигательных функций в единственной временной точке после инсульта, обычно через 3–6 мес [11]. Однако полученные результаты свидетельствуют о том, что изменения активности нервной ткани и регионального церебрального кровотока после инсульта происходят в обоих полушариях, следовательно, для отслеживания процессов их восстановления требуются длительные исследования в динамике, которые обычно начинаются в первые несколько недель после клинической манифестации инсульта и продолжаются от нескольких месяцев до 1 года после нее. Поэтому фМРТ у таких пациентов целесообразно проводить по меньшей мере в острой стадии, а затем через 3 нед и через 6 мес.

В то же время необходимо отметить, что систематические исследования головного мозга с помощью фМРТ, в которых охватываются временные промежутки как в ранние, так и различные отсроченные периоды после ОНМК у одних и тех же пациентов, отсутствуют. Это актуализирует необходимость исследований, учитывающих вышесказанное, для более глубокого понимания процессов восстановления нервной ткани и качественной систематизации информации, получаемой с помощью фМРТ.

Другой точкой приложения фМРТ является изучение цереброваскулярной реактивности (ЦВР) у больных, перенесших ишемический инсульт. Цереброваскулярная реактивность – это способность сосудов головного мозга расширяться или сужаться в ответ на внешние или внутренние воздействия. Оценка ЦВР имеет важное значение для выявления латентной недостаточности мозгового кровообращения и глубины дезадаптации мозга в экстремальных условиях [26]. Цереброваскулярная реактивность, наряду с такими традиционными параметрами, как скорость и объем мозгового кровотока (CBF и CBV соответственно), является одним из наиболее ценных показателей состояния церебрального кровоснабжения и предоставляет важную информацию о сосудистых резервах [24]. Измерение ЦВР помогает оценивать нейроваскулярное разобщение, проявляющееся ложноотрицательной или ложноположительной активацией коры головного мозга на задачи при фМРТ. Установлено, что оценка ЦВР может помочь оптимизировать стратегии лечения пациентов с ишемическим инсультом [27].

Таким образом, внедрение в клиническую практику фМРТ может существенно улучшить прогнозирование реабилитационного потенциала пациентов, перенесших ишемический инсульт, и значительно повлиять на алгоритм их восстановительного лечения.

ВОЗМОЖНОСТИ ASL-MPT В ОЦЕНКЕ МОЗГОВОГО КРОВОТОКА

Для понимания процессов, протекающих в нервной ткани после ОНМК и прогнозирования исходов реабилитационных мероприятий, важное значение имеет оценка состояния коллатерального кровообращения головного мозга. Изучение сосудистых коллатералей головного мозга и определение их функционального состояния имеют чрезвычайно важное значение в оценке выраженности феномена реперфузии, риска развития кровотечений и степени восстановления утраченных мозговых функций.

На сегодняшний день для определения состояния коллатерального кровообращения используются различные модальности медицинской визуализации, включающие ультразвуковые технологии (прежде всего, дуплексное сканирование сонных артерий и транскраниальную доплерографию), а также методы компьютерной томографии и МРТ. Однако традиционные статические МР-технологии оценки кровотока имеют существенные ограничения, в то время как МРТ с маркировкой спинов артериальной крови (arterial spin labeling, ASL), ASL-MPT, позволяет проводить изучение церебральной гемодинамики на качественно более высоком уровне [28, 29].

ASL-MPT – это один из новых методов перфузионной МРТ, основанный на том, что под действием радиочастотных импульсов, подающихся проксимальнее зоны интереса, происходит инверсия спинов атомов водорода, содержащихся в артериальной крови, что в итоге позволяет получать информацию о состоянии перфузии головного мозга, не прибегая к каким-либо вводимым в организм пациента контрастным агентам [29]. На сегодняшний день существует много научных работ, свидетельствующих о важных прикладных аспектах использования ASL-MPT на различных стадиях ишемического инсульта.

Так, в исследовании, выполненном G. Crisi и соавт. [29], показано, что метод ASL-MPT может стать неотъемлемой частью протокола МР-исследования пациентов с инсультом, не получавших лечения в течение 24–36 ч на основании возможности регистрации положительных эффектов реперфузии после реканализации. В другой недавней работе

S.S. Lu и соавт. [28] определили, что изменения перфузионных показателей головного мозга, выявленные с помощью ASL-MPT, коррелировали с результатами реканализации, в связи с чем предложили использовать количественные показатели ASL-MPT в качестве независимого прогностического маркера благоприятных неврологических исходов у пациентов с острым ишемическим инсультом через 90 дней после тромбоэкстракции.

J. Wang и соавт. [22], исследуя возможности ASL-MPT в оценке церебральной перфузии у пациентов с перекрестным диашизом мозжечка, пришли к выводу, что показатель CBF, вычисленный с помощью ASL-MPT, может быть ценным предиктором развития данного состояния у пациентов с супратенториальным инсультом, а риск развития перекрестного диашиза мозжечка статистически значимо связан с нарастанием объема ишемического поражения большого мозга и более высоким исходным баллом по шкале NIHSS (National Institutes of Health Stroke Scale) [29].

Вместе с тем S. Vercluyte и соавт. сделали вывод, что ASL-MPT не следует использовать в качестве рутинной технологии из-за большой продолжительности исследования, несмотря на то, что она позволяет получать ценную информацию для дифференциальной диагностики в конкретных клинических ситуациях, оценивать эффективность лечения на ранних стадиях ишемического инсульта и осуществлять неинвазивную оценку размеров пенумбры [30].

Одной из серьезных проблем, возникающих при лечении пациентов с ОНМК, является геморрагическая трансформация острого ишемического инсульта, развивающаяся после реперфузионной терапии. Таким образом, раннее обнаружение зон гиперперфузии в головном мозге после реперфузионной терапии может позволить снизить риск возникновения данного состояния за счет более тщательно подобранного лечения [31]. В современной литературе имеются исследования, свидетельствующие о том, что гиперперфузия, выявленная по данным ASL-MPT у пациентов с острым ишемическим инсультом после внутривенного тромболизиса или эндоваскулярного вмешательства, может являться надежным предиктором геморрагической трансформации ишемического инсульта.

В 2019 г. J. Lu и соавт. [32] продемонстрировали уникальные возможности ASL-MPT в неинвазивной оценке состояния церебральной гемодинамики, в том числе у пациентов после ишемического инсульта, для чего использовали новую технологию множественных задержек после маркирования протонов – PLD (post-labeling delay). Авторы данного исследо-

вания подчеркивают, что использование PLD-технологии требует индивидуализированного подхода к каждому пациенту, поскольку задержка после маркирования протонов (PLD) должна как можно точнее соответствовать времени, необходимому для того, чтобы маркированные протоны достигли области интереса и в конечном счете сгенерировали МР-сигнал. Если PLD слишком короткая, то весь помеченный болюс может не успеть полностью распределиться по исследуемой ткани мозга, особенно в важных для диагностики областях. Это может привести к значительной локальной потере МР-сигнала. В свою очередь, это может быть ошибочно расценено как следствие гипоперфузии [31].

К возникновению ложно определяемых областей гипоперфузии также могут приводить факторы, связанные с особенностями пациента (например, с наличием у него стеноза отходящих от аорты крупных артериальных стволов), что обуславливает увеличение времени доставки маркированных протонов к области интереса. В этом случае различить ложную и истинную гипоперфузию может быть весьма затруднительно. При использовании технологии PLD также могут наблюдаться артефакты, связанные с особенностями строения Виллизиева круга. Таким образом, PLD является важным параметром, который необходимо корректировать в соответствии с состоянием кровообращения пациента для избегания диагностических ошибок [32].

Подводя итог значимости ASL-MPT, необходимо отметить, что на данный момент эта технология не является общепризнанной методикой, с помощью которой прогнозируется неврологический статус, склонность к геморрагической трансформации и исходы ОНМК. Более того, крупных исследований возможностей ASL-MPT в изучении процессов диализа в головном мозге на сегодняшний день не проведено [33].

Помимо этого, в мировой литературе не уделено достаточного внимания анализу показателя CBF, вычисленного по данным ASL-MPT, как предиктора развития диализа мозжечка. Также на больших выборках пациентов не было показано, что гиперперфузия, выявленная с помощью ASL-MPT, может служить предиктором геморрагической трансформации ишемического инсульта, не решена проблема длительности процедуры ASL-MPT. Таким образом, необходимо проведение дальнейших исследований с изучением больших выборок пациентов в ранних и отдаленных временных точках после ОНМК для внедрения технологии ASL-MPT в диагностический алгоритм исследования данной категории пациентов.

ВОЗМОЖНОСТИ ДИФфуЗИОННО-ТЕНЗОРНОЙ МРТ В ОЦЕНКЕ МОЗГОВОГО КРОВОТОКА

Еще одним неинвазивным методом МР-визуализации, используемым у пациентов с перенесенным ОНМК, является диффузионно-тензорная МРТ [34]. Диффузионно-тензорная МРТ – это метод, который позволяет *in vivo* измерять направленность движения молекул воды, предоставляя информацию о степени его анизотропии в различных тканях. На основании анизотропии процессов диффузии, протекающих в тканях ЦНС, ДТ-МРТ позволяет изучать структуру проводящих путей и реконструировать трехмерные изображения комиссуральных, ассоциативных и проекционных трактов [35].

Результаты ДТ-МРТ представляют собой векторные карты, в которых для кодирования направления диффузии молекул воды используется цвет. Чаще всего красным обозначается движение молекул воды «вправо-влево», зеленым – «вперед-назад», синим – «вверх-вниз» [36]. Считается, что ДТ-МРТ (также называемая трактографией) может дать ценную информацию о состоянии как основных проводящих путей, пострадавших вследствие ишемического инсульта, так и путей, обеспечивающих компенсацию утраченных мозговых функций.

Так, R.M. Umarova и соавт. (2017) [33], используя трактографию, выяснили, что большие поражения взаимосвязанных участков коры вызывают крупномасштабную структурную реорганизацию нейронных связей и обуславливают появление разнообразной симптоматики и неврологического дефицита. M.M. Visser и соавт. (2019) [35], исследуя пациентов с острым ишемическим инсультом в течение первой недели после ОНМК, а также через 1 и 3 мес, пришли к выводу о том, что изменения белого вещества головного мозга после ишемического инсульта могут быть локализованным, а не глобальным явлением.

Таким образом, анализ трактов белого вещества по данным ДТ-МРТ является одним из ключевых аспектов изучения процессов состояния ткани головного мозга после ОНМК [37, 38]. Так, при изучении восстановления двигательных нарушений после ишемического инсульта основным исследуемым проводящим путем является КСТ. В последние годы растет количество данных, свидетельствующих о том, что объединение клинических оценок с информацией о целостности КСТ, получаемой с помощью ДТ-МРТ, может повышать точность прогнозирования восстановления моторных функций. Более того, по мнению многих ученых, степень повреждения КСТ на ДТ-МРТ является основным прогностиче-

ским фактором, определяющим степень восстановления двигательной активности после ишемических инсультов [39, 40].

Одной из важнейших количественных величин, отражающих целостность структур головного мозга и их структурно-функциональную организацию, является коэффициент фракционной анизотропии (КФА). Т. Коуата и соавт. [41] показали, что КФА в КСТ может явиться потенциальным маркером восстановления моторных функций конечностей. Данные авторы определили, что с помощью КФА, измеренном в верхнем продольном пучке (ВПП), возможна прогностическая оценка когнитивного состояния пациентов после перенесенного ишемического инсульта. К аналогичным результатам пришли в 2024 г. и L.M. Moura и соавт. [42]. А J. Puig и соавт. в 2019 г. предложили основные стратегии для количественной оценки повреждения КСТ при ишемическом инсульте, которые включали в себя измерение КФА дистальнее области инсульта, измерение количества проходящих через тракт волокон и сравнение изменений состояния КСТ в области инсульта у перенесших его пациентов и состояния КСТ у здоровых добровольцев соответствующего возраста и пола [43].

В настоящее время кроме КСТ с помощью ДТ-МРТ возможно изучение и других трактов ЦНС, но исследований, проведенных в этом направлении, сравнительно немного, хотя их результаты весьма интересные. Так, Z. Keser (2020) и E.L. Meier (2024) [44, 45] анализировали дугообразный пучок (ДП), нижний продольный пучок (НПП), нижний лобно-затылочный пучок (НЛЗП), крючковидный пучок (КП) у пациентов с афазией после левостороннего ишемического инсульта. Авторы пришли к выводу, что ДТ-МРТ может предоставлять ценную клиническую информацию для прогнозирования восстановления речевых функций, а уровень целостности НПП, в частности, является прогностическим маркером глубины восстановления понимания речи.

В этот же период M. Blom-Smink и соавт. (2020) [39], изучая с помощью ДТ-МРТ состояние НПП, НЛЗП, КП, ВПП и среднего продольного пучка (СПП) у той же категории пациентов, что и в предыдущей работе, пришли к аналогичному выводу о влиянии целостности НПП на процессы восстановления функций речи при афазии. Z. Gong и соавт. (2020) [45] также изучали возможности прогнозирования восстановления двигательных функций по данным ДТ-МРТ, но уже в группе пациентов с поражением функций кисти после гипертонического внутримозгового кровоизлияния, и пришли к выводам о том, что данную лучевую технологию можно ис-

пользовать для визуализации повреждения волокон КСТ кисти. Кроме этого, этими же авторами установлено, что реабилитационные мероприятия, проводимые для восстановления функции кисти после гипертонического внутримозгового кровоизлияния, оказались наиболее эффективными у пациентов поврежденным КСТ лишь частично.

Вместе с тем технология ДТ-МРТ, используемая для диагностики последствий инсультов головного мозга, на сегодняшний день не лишена проблемных аспектов, основным из которых является ее зависимость от объема и локализации участков патологических изменений, влияющих на регистрацию, постпроцессорную обработку и представление визуальных данных. Также искажать получаемую информацию о трактах белого вещества может и вторичное расширение ликворных пространств, заполненных спинномозговой жидкостью.

Таким образом, проводя оценку данных ДТ-МРТ, необходимо учитывать искажения типичной анатомии головного мозга после перенесенных ишемических инсультов, а стандартизация этой оценки весьма затруднительна. Это приводит к тому, что несмотря на обнадеживающие перспективы использования ДТ-МРТ в клинической практике, данная технология пока не нашла широкого применения для оценки реабилитационного потенциала у пациентов после ОНМК. Однако несмотря на достаточно высокую распространенность изучения КСТ, другие тракты, такие как ВПП, ДП, НПП, НЛЗП, КП, СПП, у пациентов после ОНМК исследованы недостаточно хорошо. Между тем, исходя из результатов немногочисленных исследований, представленных в литературных источниках, их целостность также может являться потенциальным предиктором степени восстановления мозговых функций, утраченных после инсульта.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, при обсуждении вопросов лечения пациентов после перенесенного ишемического инсульта становится очевидным, что для оценки нейропластичности головного мозга и, следовательно, реабилитационного потенциала таких пациентов требуется выполнение мультимодальной МРТ. Однако, несмотря на то, что с помощью мультимодальной МРТ возможно выявление предикторов восстановления утраченных после ОНМК мозговых функций, количество масштабных и долговременных научных исследований структурных и функциональных изменений головного мозга после ишемического инсульта на сегодняшний день явно недостаточно для того, чтобы понимать ее место в рутинной клинической практике.

Также не определено клиническое значение каждого из диагностических компонентов мультипараметрической МРТ в конкретной клинической ситуации.

В связи с вышеизложенным следует отметить, что в настоящее время отсутствует общепринятый диагностический алгоритм исследования пациентов, перенесших ишемический инсульт, с помощью мультипараметрической МРТ [16]. Следовательно, разработка доступного алгоритма оценки реабилитационного потенциала у пациентов после ишемического инсульта, включающего мультипараметрическую МРТ, должна явиться целью последующих крупных научных исследований, направленных на более глубокое изучение информативности отдельных модальностей МРТ, их комбинаций друг с другом и с клиническими оценками, параллельно с преодолением проблем внедрения данной лучевой технологии в широкую клиническую практику.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Osborne A.G., Zaltsman K.L., Assure M.D. Radiation diagnostics. *Brain*. 2018;248.
2. Campbell B.C.V., De Silva D.A., Macleod M.R. Ischaemic stroke. *Nat. Rev. Dis. Primers* 5. 2019;70. DOI: 10.1038/s41572-019-0118-8.
3. Zhao Y., Zhang X., Chen X., Wei Y. Neuronal injuries in cerebral infarction and ischemic stroke: From mechanisms to treatment (Review). *Int. J. Mol. Med.* 2022;49(2):15. DOI: 10.3892/ijmm.2021.5070.
4. Feigin V.L., Brainin M., Norrving B., Martins S., Sacco R.L., Hacke W. et al. World Stroke Organization (WSO): Global Stroke Fact Sheet 2022. *Int. J. Stroke*. 2022;17(1):18–29. DOI: 10.1177/174749302111065917.
5. Saini V., Guada L., Yavagal D.R. Global epidemiology of stroke and access to acute ischemic stroke interventions. *Neurology*. 2021;16(97):S6–S16. DOI: 10.1212/WNL.00000000000012781.
6. Zhang J., Lu C., Wu X., Nie D., Yu H. Neuroplasticity of Acupuncture for Stroke: An Evidence-Based Review of MRI. *Neural. Plast.* 2021;2021:2662585. DOI: 10.1155/2021/2662585.
7. Guggisberg A.G., Koch P.J., Hummel F.C., Bueteifisch C.M. Brain networks and their relevance for stroke rehabilitation. *Clin. Neurophysiol.* 2019;130(7):1098–1124. DOI: 10.1016/j.clinph.2019.04.004.
8. Hartwigsen G., Volz L.J. Probing rapid network reorganization of motor and language functions via neuromodulation and neuroimaging. *Neuroimage*. 2021;224:117449. DOI: 10.1016/j.neuroimage.2020.117449.
9. Innocenti G.M. Defining neuroplasticity. *Handb. Clin. Neurol.* 2022;184:3–18. DOI: 10.1016/B978-0-12-819410-2.00001-1. PMID: 35034744.
10. Joy M.T., Carmichael S.T. Encouraging an excitable brain state: mechanisms of brain repair in stroke. *Nat. Rev. Neurosci.* 2021;22(1):38–53. DOI: 10.1038/s41583-020-00396-7.
11. Johnson B.P., Cohen L.G. Applied strategies of neuroplasticity. *Handb. Clin. Neurol.* 2023;196:599–609. DOI: 10.1016/B978-0-323-98817-9.00011-9.
12. Xing Y., Bai Y. A Review of Exercise-Induced Neuroplasticity in Ischemic Stroke: Pathology and Mechanisms. *Mol. Neurobiol.* 2020;57(10):4218–4231. DOI: 10.1007/s12035-020-02021-1.
13. Włodarczyk L., Cichon N., Saluk-Bijak J., Bijak M., Majos A., Miller E. Neuroimaging techniques as potential tools for assessment of angiogenesis and neuroplasticity processes after stroke and their clinical implications for rehabilitation and stroke recovery prognosis. *J. Clin. Med.* 2022;11(9):2473. DOI: 10.3390/jcm11092473.
14. Bhasin A., Srivastava P., Kumaran S.S. Correlation of DTI-derived measures to therapy-mediated recovery after stroke: preliminary findings. *Neurol. India*. 2021;69(5):1210–1216. DOI: 10.4103/0028-3886.329584.
15. Yang H.E., Kyeong S., Kang H., Kim D.H. Multimodal magnetic resonance imaging correlates of motor outcome after stroke using machine learning. *Neurosci. Lett.* 2021;741:135451. DOI: 10.1016/j.neulet.2020.135451.
16. Ball E.L., Shah M., Ross E., Sutherland R., Squires C., Mead G.E. et al. Predictors of post-stroke cognitive impairment using acute structural MRI neuroimaging: A systematic review and meta-analysis. *Int. J. Stroke*. 2023;18(5):543–554. DOI: 10.1177/17474930221120349.
17. Nael K., Yoo B., Salamon N., Liebeskind D.S. Acute ischemic stroke: MR imaging-based paradigms. *Neuroimaging Clin. N. Am.* 2021;31(2):177–192. DOI: 10.1016/j.nic.2021.01.002. PMID: 33902873.
18. Garcia-Esperon C., Raposo N., Seners P., Spratt N., Parsons M., Olivot J.M. Role of neuroimaging before reperfusion therapy. Part 1 – IV thrombolysis – Review. *Rev. Neurol. (Paris)*. 2021;177(8):908–918. DOI: 10.1016/j.neurol.2020.10.007.
19. Zhang Y.L., Zhang J.F., Wang X.X., Wang Y., Anderson C.S., Wu Y.C. Wake-up stroke: imaging-based diagnosis and recanalization therapy. *J. Neurol.* 2021;268(11):4002–4012. DOI: 10.1007/s00415-020-10055-7.
20. Atchaneeyasakul K., Liebeskind D.S., Jahan R., Starkman S., Sharma L., Yoo B. et al. UCLA reperfusion therapy investigators. Efficient multimodal MRI evaluation for endovascular thrombectomy of anterior circulation large vessel occlusion. *J. Stroke Cerebrovasc. Dis.* 2020;29(12):105271. DOI: 10.1016/j.jstrokecerebrovasdis.2020.105271.
21. Lee H., Jung K., Kang D.W., Kim N. Fully Automated and real-time volumetric measurement of infarct core and penumbra in diffusion- and perfusion-weighted mri of patients with hyper-acute stroke. *J. Digit. Imaging*. 2020;33(1):262–272. DOI: 10.1007/s10278-019-00222-2.
22. Xiao Z.P., Jin K., Wan J.Q., Lin Y., Pan Y.H., Jin Y.C. et al. Measurement of cerebrovascular reserve by multimodal imaging for cerebral arterial occlusion or stenosis patients: protocol of a prospective, randomized, controlled clinical study. *Trials*. 2020;21(1):49. DOI: 10.1186/s13063-019-3967-2.
23. Liu J., Wang Q., Liu F., Song H., Liang X., Lin Z. et al. Altered functional connectivity in patients with post-stroke memory impairment: A resting fMRI study. *Exp. Ther. Med.* 2017;14(3):1919–1928. DOI: 10.3892/etm.2017.4751.
24. Wu C.W., Lin S.N., Hsu L.M., Yeh S.C., Guu F., Lee S.H., Chen C.C. Synchrony Between Default-Mode and Sensorimotor Networks Facilitates Motor Function in Stroke Rehabilitation.

- tion: A Pilot fMRI Study. *Front. Neurosci.* 2020;14:548. DOI: 10.3389/fnins.2020.00548.
25. Du J., Yang F., Zhang Z. et al. Early functional MRI activation predicts motor outcome after ischemic stroke: a longitudinal, multimodal study. *Brain Imaging and Behavior.* 2018;12:1804–1813. DOI: 10.1007/s11682-018-9851-y.
 26. Belani P., Kihira S., Pacheco F., Pawha P., Cruciata G., Nael K. Addition of arterial spin-labelled MR perfusion to conventional brain MRI: clinical experience in a retrospective cohort study. *BMJ Open.* 2020;10(6):e036785. DOI: 10.1136/bmjopen-2020-036785.
 27. Wang J., Pan L.J., Zhou B., Zu J.Y., Zhao YX, Li Y. et al. Crossed cerebellar diaschisis after stroke detected noninvasively by arterial spin-labeling MR imaging. *BMC Neurosci.* 2020;21(1):46. DOI: 10.1186/s12868-020-00595-z.
 28. Lu S.S., Cao Y.Z., Su C.Q., Xu X.Q., Zhao L.B., Jia Z.Y. et al. Hyperperfusion on arterial spin labeling MRI predicts the 90-day functional outcome after mechanical thrombectomy in ischemic stroke. *J. Magn. Reson. Imaging.* 2021;53(6):1815–1822. DOI: 10.1002/jmri.27455.
 29. Crisi G., Filice S., Scoditti U. Arterial spin labeling mri to measure cerebral blood flow in untreated ischemic stroke. *J. Neuroimaging.* 2019;29(2):193–197. DOI: 10.1111/jon.12569.
 30. Verclytte S., Fisch O., Colas L., Vanaerde O., Toledano M., Budzik J.F. ASL and susceptibility-weighted imaging contribution to the management of acute ischaemic stroke. *Insights Imaging.* 2017;8(1):91–100. DOI: 10.1007/s13244-016-0529-y.
 31. Santos L.A., Sullivan B., Kvist O., Jambawalikar S., Mostoufi-Moab S., Raya J.M. et al. Diffusion tensor imaging of the physis: the ABC's. *Pediatr. Radiol.* 2023;53(12):2355–2368. DOI: 10.1007/s00247-023-05753-z.
 32. Lyu J., Ma N., Tian C. et al. Perfusion and plaque evaluation to predict recurrent stroke in symptomatic middle cerebral artery stenosis. *Stroke and Vascular Neurology.* 2019;4(3):129–134. DOI: 10.1136/svn-2018-000228.
 33. Umarova R.M., Beume L., Reisert M., Kaller C.P., Klöppel S., Mader I. et al. Distinct white matter alterations following severe stroke: Longitudinal DTI study in neglect. *Neurology.* 2017;88(16):1546–1555. DOI: 10.1212/WNL.00000000000003843.
 34. Levashkina I.M., Serebryakova S.V., Efimtsev A. Yu. Diffusion-tensor MRI – the most up-to-date method to research microstructural changes in white matter (publications' review). *Vestnik SPbSU. Series 11. Medicine.* 2016;4:39–54. DOI: 10.21638/11701/spbu11.2016.404.
 35. Visser M.M., Yassi N., Campbell B.C.V., Desmond P.M., Davis S.M., Spratt N. et al. White Matter Degeneration after Ischemic Stroke: A Longitudinal Diffusion Tensor Imaging Study. *J. Neuroimaging.* 2019;29(1):111–118. DOI: 10.1111/jon.12556.
 36. Egorova-Brumley N., Dhollander T., Khan W., Khlif M.S., Ebaid D., Brodtmann A. Changes in white matter microstructure over 3 years in people with and without stroke. *Neurology.* 2023;100(16):e1664–e1672. DOI: 10.1212/WNL.0000000000207065.
 37. Lewis A.F., Myers M., Heiser J., Kolar M., Baird J.F., Stewart J.C. Test-retest reliability and minimal detectable change of corticospinal tract integrity in chronic stroke. *Hum. Brain Mapp.* 2020;41(9):2514–2526. DOI: 10.1002/hbm.24961.
 38. Liu J., Wang C., Qin W., Ding H., Guo J., Han T. et al. Corticospinal fibers with different origins impact motor outcome and brain after subcortical stroke. *Stroke.* 2020;51(7):2170–2178. DOI: 10.1161/STROKEAHA.120.029508.
 39. Blom-Smink M., Verly M., Spielmann K., Smits M., Ribbers G.M., van de Sandt-Koenderman M.W.M.E. Change in right inferior longitudinal fasciculus integrity is associated with naming recovery in subacute poststroke aphasia. *Neurorehabil. Neural Repair.* 2020;34(9):784–794. DOI: 10.1177/1545968320940982.
 40. Keser Z., Meier E.L., Stockbridge M.D., Hillis A.E. The role of microstructural integrity of major language pathways in narrative speech in the first year after stroke. *J. Stroke Cerebrovasc. Dis.* 2020;29(9):105078. DOI: 10.1016/j.jstrokecerebrovasdis.2020.105078.
 41. Mochizuki M., Uchiyama Y., Domen K. et al. Associations between stroke outcome assessments and automated tractography fractional anisotropy incorporating age. *Ann. Rehabil. Med.* 2025;49(1):15–22. DOI: 10.5535/arm.240073.
 42. Mahmoud B.E., Mohammad M.E., Serour D.K. What can DTI add in acute ischemic stroke patients? *Egypt J. Radiol. Nucl. Med.* 2019;50:67. DOI: 10.1186/s43055-019-0058-z.
 43. Puig J., Blasco G., Schlaug G. et al. Diffusion tensor imaging as a prognostic biomarker for motor recovery and rehabilitation after stroke. *Neuroradiology.* 2017;59:343–351. DOI: 10.1007/s00234-017-1816-0.
 44. Keser Z. et al. The role of microstructural integrity of major language pathways in narrative speech in the first year after stroke. *Journal of Stroke and Cerebrovascular Diseases.* 2020;29(9). DOI: 1016/j.jstrokecerebrovasdis.2020.105078.
 45. Nägele F.L., Petersen M., Mayer C. et al. Longitudinal microstructural alterations surrounding subcortical ischemic stroke lesions detected by free-water imaging. *Hum. Brain Mapp.* 2024;45(8):e26722. DOI: 10.1002/hbm.26722.
 46. Gong Z., Zhang R., Jiang W. et al. Integrity of the hand fibers of the corticospinal tract shown by diffusion tensor imaging predicts hand function recovery after hemorrhagic stroke. *J. Stroke Cerebrovasc. Dis.* 2021;30(1):105447. DOI: 10.1016/j.jstrokecerebrovasdis.2020.105447.

Информация об авторах

Куражов Алексей Петрович – врач-рентгенолог, д-р мед. наук, профессор кафедры лучевой диагностики и лучевой терапии, СибГМУ, г. Томск, kurazhovap@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1316-5421>

Алифирова Валентина Михайловна – врач-невролог, д-р мед. наук, профессор, зав. кафедрой неврологии и нейрохирургии, СибГМУ, г. Томск, v_alifirova@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-4140-3223>

Королёва Екатерина Сергеевна – врач-невролог, д-р мед. наук, профессор кафедры неврологии и нейрохирургии, СибГМУ, г. Томск, kattarina@list.ru, <http://orcid.org/0000-0003-1911-166X>

Дегтярев Илья Юрьевич – врач-рентгенолог, аспирант, кафедра лучевой диагностики и лучевой терапии, СибГМУ, г. Томск, ilya.degtyarev.4201@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-8812-4168>

Лойко Юлия Николаевна – врач-рентгенолог, ЛДЦ, МИБС, г. Томск, loikojulian@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0002-1889-4554>

Кучерова Кристина Сергеевна – врач-невролог, ассистент кафедры неврологии и нейрохирургии, СибГМУ, г. Томск, kristyajka@ya.ru, <http://orcid.org/0000-0003-4968-4012>

Суханова Кристина Сергеевна – врач-рентгенолог, отделение компьютерной томографии, клиники СибГМУ, г. Томск, athos227930@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0001-9449-8564>

Завадовская Вера Дмитриевна – врач-рентгенолог, д-р мед. наук, профессор, зав. кафедрой лучевой диагностики и лучевой терапии, СибГМУ, г. Томск, wdzav@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0001-6231-7650>

(✉) **Куражов Алексей Петрович**, kurazhovap@mail.ru

Поступила в редакцию 28.10.2025;
одобрена после рецензирования 12.11.2025;
принята к публикации 20.11.2025