



ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

Оригинальная статья

УДК 616-001.31

<https://doi.org/10.52560/2713-0118-2026-1-60-80>

Возможности МР-трактографии в прогнозировании двигательных и речевых нарушений у пациентов с диффузным аксональным повреждением

Р. М. Афандиев¹, Н. Е. Захарова², Э. Л. Погосбемян³,
А. И. Баталов⁴, Б. А. Царукаев⁵, И. Н. Пронин⁶

¹⁻⁶ ФГАУ «НМИЦ нейрохирургии им. ак. Н. Н. Бурденко» Минздрава России, Москва, Россия

¹ <https://orcid.org/0000-0001-6384-7960>

² <https://orcid.org/0000-0002-0516-3613>

³ <https://orcid.org/0000-0002-4803-6948>

⁴ <https://orcid.org/0000-0002-8924-7346>

⁵ <https://orcid.org/0000-0003-2684-8344>

⁶ <https://orcid.org/0000-0002-4480-0275>

Автор, ответственный за переписку: Рамин Малик оглы Афандиев,
rafandiev@qnsi.ru

Аннотация

Актуальность настоящего исследования обусловлена необходимостью разработки объективного нейровизуализационного критерия для ранней диагностики и прогнозирования отдаленных неврологических исходов у пациентов с диффузным аксональным повреждением (ДАП). Комплексная оценка состояния основных проводящих путей с применением современных методов визуализации диффузионно-тензорной МРТ (ДТ МРТ) и HARDI-CSD и последующим катанестическим наблюдением является новым и перспективным направлением в нейротравматологии.

Цель исследования. Проанализировать взаимосвязь параметра фракционной анизотропии (ФА) в кортикоспинальных и аркуатных трактах белого вещества головного мозга с основными показателями неврологического статуса и функциональными исходами у пациентов с острым ДАП.

Материалы и методы. В исследование включены 74 пациента с ДАП и 12 здоровых добровольцев. Всем пациентам с ДАП в остром периоде (до 1 месяца) черепно-мозговой травмы (ЧМТ) была проведена ДТ МРТ, а также выполнена последовательность МРТ HARDI-CSD. Исследовали усредненный параметр ФА на всем протяжении кортикоспинальных и аркуатных трактов с последующим сопоставлением с отдаленными функциональными исходами (не ранее чем через 3 месяца после травмы).

© Афандиев Р. М., Захарова Н. Е., Погосбемян Э. Л., Баталов А. И., Царукаев Б. А., Пронин И. Н., 2026

Результаты. Выявлены достоверные различия параметра FA ($p < 0,001$) у здоровых добровольцев и пациентов с ДАП, а также у пациентов с двигательными/речевыми нарушениями и без них. У пациентов с неблагоприятным исходом отмечалось достоверное снижение параметра FA в кортикоспинальных ($p < 0,001$) и аркуатных трактах ($p = 0,003–0,007$) по сравнению с группой благоприятного исхода. Снижение FA в остром периоде травмы в кортикоспинальных трактах до значений 0,47–0,54 продемонстрировало высокую информативность в прогнозировании двигательных нарушений (AUC = 0,98–0,99), тогда как снижение FA в остром периоде травмы в аркуатных трактах до 0,39–0,45 ассоциировалось с речевыми нарушениями (AUC = 0,90–0,95).

Выводы. Параметр FA является информативным для дифференцирования здоровых и поврежденных проводящих путей головного мозга, а также прогнозирования исхода при ДАП.

Ключевые слова: трактография, диффузное аксональное повреждение, кортикоспинальный тракт, аркуатный тракт

Для цитирования: Афандиев Р. М., Захарова Н. Е., Погосбемян Э. Л., Баталов А. И., Царукаев Б. А., Пронин И. Н. Возможности МР-трактографии в прогнозировании двигательных и речевых нарушений у пациентов с диффузным аксональным повреждением // Радиология — практика. 2026;1:60-80. <https://doi.org/10.52560/2713-0118-2026-1-60-80>

Источники финансирования

Исследование не финансировалось какими-либо источниками.

Конфликт интересов

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

Захарова Н. Е., доктор медицинских наук, профессор РАН, главный научный сотрудник отделения рентгеновских и радиоизотопных методов диагностики ФГАУ «НМИЦ нейрохирургии им. ак. Н. Н. Бурденко» Минздрава России, является членом редакционного совета журнала «Радиология — практика». Авторам неизвестно о каких-либо других потенциальных конфликтах интересов, связанных с этой рукописью.

Пронин И. Н., доктор медицинских наук, профессор, академик РАН, заведующий отделением рентгеновских и радиоизотопных методов диагностики ФГАУ «НМИЦ нейрохирургии им. ак. Н. Н. Бурденко» Минздрава России, является членом редакционного совета журнала «Радиология — практика». Авторам неизвестно о каких-либо других потенциальных конфликтах интересов, связанных с этой рукописью.

Соответствие принципам этики

Работа соответствует этическим нормам Хельсинкской декларации Всемирной медицинской ассоциации «Этические принципы проведения научных медицинских исследований с участием человека» с поправками 2008 года и «Правилами клинической практики в Российской Федерации», утвержденными Приказом Минздрава РФ от 19.06.2003.

ORIGINAL RESEARCH

Original article

The Capabilities of MR Tractography in Predicting Motor and Speech Disorders in Patients with Diffuse Axonal Injury

Ramin M. Afandiev¹, Natalia E. Zakharova², Eduard L. Pogosbekyan³,
Artem I. Batalov⁴, Batradz A. Tsarukaev⁵, Igor N. Pronin⁶

^{1–6}Burdenko National Medical Research Center of Neurosurgery of the Ministry of Health of the Russian Federation, Moscow, Russia

¹<https://orcid.org/0000-0001-6384-7960>

²<https://orcid.org/0000-0002-0516-3613>

³<https://orcid.org/0000-0002-4803-6948>

⁴<https://orcid.org/0000-0002-8924-7346>

⁵<https://orcid.org/0000-0003-2684-8344>

⁶<https://orcid.org/0000-0002-4480-0275>

Corresponding author: Ramin M. Afandiev, rafandiev@nsi.ru

Abstract

The relevance of this study is driven by the need to develop an objective neuroimaging criterion for the early diagnosis and prediction of long-term neurological outcomes in patients with diffuse axonal injury (DAI). A comprehensive assessment of the condition of major neural pathways using modern imaging techniques such as diffusion tensor MRI (DTI) and HARDI-CSD, followed by follow-up observation, represents a new and promising direction in neurotrauma.

Aim. To analyze the relationship between fractional anisotropy (FA) parameters in the corticospinal and arcuate tracts of the cerebral white matter and key neurological status indicators and functional outcomes in patients with acute diffuse axonal injury (DAI).

Materials and Methods. The study included 74 patients with DAI and 12 healthy volunteers. In the acute phase (within 1 month) of traumatic brain injury (TBI), all DAI patients underwent diffusion tensor MRI (DTI), and an HARDI-CSD MRI sequence was also performed. The study involved analyzing the mean fractional anisotropy (FA) parameter along the entire length of the corticospinal and arcuate tracts, with subsequent correlation to long-term functional outcomes (assessed no earlier than 3 months post-injury).

Results. Significant differences in FA parameters ($p < 0.001$) were found between healthy volunteers and DAI patients, as well as between patients with and without motor/speech impairments. Patients with unfavorable outcomes showed significant decrease in FA parameters in both corticospinal ($p < 0.001$) and arcuate tracts ($p = 0.003–0.007$) compared to the favorable outcome group. Reduction of FA in corticospinal tracts to 0.47–0.54 during the acute injury phase demonstrated high predictive value for motor impairments (AUC = 0.98–0.99), while decrease in arcuate tract FA to 0.39–0.45 was associated with speech disorders (AUC = 0.90–0.95).

Conclusion. The FA parameter is informative for differentiating between healthy and impaired cerebral pathways and predicting outcomes in DAI.

Keywords: Tractography, Diffuse Axonal Injury, Corticospinal Tract, Arcuate Tract

For citation: Afandiev R. M., Zakharova N. E., Pogosbekyan E. L., Batalov A. I., Tsarukaev B. A., Pronin I. N. The Capabilities of MR Tractography in Predicting Motor and Speech Disorders in Patients with Diffuse Axonal Injury. *Radiology – Practice*. 2026;1:60-80. (In Russ.). <https://doi.org/10.52560/2713-0118-2026-1-60-80>

Funding

The study was not funded by any sources.

Conflicts of Interest

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).

The author, Prof. Natalia E. Zakharova, is a member of the Editorial Board of «Radiology – Practice». The authors are not aware of any other potential conflict of interest relating to this manuscript.

The author, Prof. Igor N. Pronin, is a member of the Editorial Board of «Radiology – Practice». The authors are not aware of any other potential conflict of interest relating to this manuscript.

Compliance with Ethical Standards

The work complies with the ethical standards of the Helsinki Declaration of the World Medical Association «Ethical Principles of conducting scientific medical research with human participation» as amended in 2008 and the «Rules of Clinical Practice in the Russian Federation» approved by the Order of the Ministry of Health of the Russian Federation dated 06/19/2003.

Актуальность

Диффузное аксональное повреждение (ДАП) является одной из наиболее тяжелых форм черепно-мозговой травмы (ЧМТ), характеризующейся распространенным поражением аксонов белого вещества головного мозга. ДАП служит основной причиной стойких неврологических нарушений и инвалидизации пациентов, среди которых наиболее часто встречаются молодые, активные люди трудоспособного возраста, что определяет значимую медико-социальную проблему [1, 3, 8, 13].

Кортикоспинальные тракты играют ключевую роль в реализации двигательной функции, а аркуатные тракты критически важны для речевой деятельности. Их повреждение при ДАП приводит к развитию парезов, пlegий и различных форм афазий, что существенно ухудшает качество жизни пациентов и затрудняет процесс реабилитации [2, 10].

Стандартные методы нейровизуализации, такие как компьютерная (КТ) и магнитно-резонансная томография (МРТ) в рутинных режимах, часто не выявляют микроструктурных изменений в белом веществе на ранних стадиях ДАП, несмотря на наличие выраженной клинической симптоматики. Это создает трудности для ранней диагностики, точного прогнозирования исхода и разработки индивидуальных реабилитационных программ [3, 4].

Диффузионно-тензорная МРТ (ДТ МРТ) и, в частности, такой параметр, как фракционная анизотропия (FA), позволяет количественно оценить целостность и ориентацию трактов белого вещества, выявляя повреждения, невидимые при стандартной МРТ [5, 6]. Однако, несмотря на потенциальные возможности, до сих пор проведено немного исследований, посвященных комплексному анализу как

кортикоспинальных, так и аркуатных трактов у пациентов с ДАП с использованием современных алгоритмов трактографии (таких как HARDI-CSD) с прогнозированием отдаленных функциональных исходов.

Таким образом, актуальность настоящего исследования обусловлена необходимостью разработки объективного нейровизуализационного критерия на основе ДТ МРТ для ранней диагностики и прогнозирования исходов у пациентов с ДАП. Комплексная оценка состояния основных проводящих путей с применением современных методов визуализации и последующим катанестическим наблюдением является новым и перспективным направлением в нейротравматологии.

Цель исследования: проанализировать взаимосвязь параметра фракционной анизотропии (FA) в кортикоспинальных и аркуатных трактах белого вещества головного мозга с основными показателями неврологического статуса и функциональными исходами у пациентов с острым диффузным аксональным повреждением (ДАП).

Материалы и методы

Исследование одобрено локальным этическим комитетом ФГАУ «НМИЦ нейрохирургии им. ак. Н. Н. Бурденко» Минздрава России. Всего было обследовано 74 пациента с ДАП различной степени тяжести. Все пациенты прошли обследование и лечение в ФГАУ «НМИЦ нейрохирургии им. ак. Н. Н. Бурденко» Минздрава России в период с 2007 по 2022 год. Среди них мужчин — 48, женщин — 26. Средний возраст пациентов составил $30,2 \pm 12,9$ года. Также была исследована контрольная группа (12 здоровых добровольцев в возрасте от 21 до 55 лет (средний возраст $33,7 \pm 11$ лет, 8 мужчин и 4 женщины) без патологических изменений вещества головного мозга, без неврологических заболеваний и ЧМТ в анамнезе.

Для пациентов с ДАП были определены критерии включения и исключения для проведения МРТ-исследования.

Критерии включения:

- 1) наличие острой черепно-мозговой травмы для пациентов из основной группы (до 1 месяца после ЧМТ);
- 2) возраст пациента от 18 до 68 лет;
- 3) наличие клинического и/или рентгенологического подтверждения ДАП;
- 4) пациенты, у которых выявлены изолированные ДАП и без грубой деформации мозга;
- 5) техническая и клиническая возможность проведения МРТ-исследования на аппарате с напряженностью магнитного поля 3 Тл;
- 6) наличие подписанного информированного добровольного согласия на участие в исследовании и обработку персональных данных, полученного лично от пациента или от его законного представителя (в случаях, когда тяжесть состояния пациента не позволяла ему сделать это самостоятельно).

Критерии исключения:

- 1) отказ от подписания информированного согласия;
- 2) противопоказания к проведению МРТ (металлические имплантаты, кардиостимуляторы, клаустрофобия и др.);
- 3) тяжесть состояния: неустойчивая гемодинамика, повышение АД, декомпенсированная сердечная недостаточность и невозможность поддержания жизненно важных функций;
- 4) предыдущие тяжелые ЧМТ или нейрохирургические операции в анамнезе;
- 5) беременность.

В ходе исследования и обработки полученных данных ни один из пациентов не был исключен из исследования.

Таким образом, в исследование было включено 74 пациента с подтвержденным на МРТ диффузным аксональным повреждением различной степени тяжести (табл. 1).

Таблица 1

Распределение пациентов в группе исследования по шкале комы Глазго (ШКГ) и полу (n = 74)

Тяжесть травмы по шкале комы Глазго	Количество пациентов		Распределение по полу			
	n	%	м	%	ж	%
15 баллов (ясное сознание)	0	0	0	0	0	0
13–14 баллов (умеренное оглушение)	5	6,76	4	5,41	1	1,35
11–12 баллов (глубокое оглушение)	4	5,41	3	4,05	1	1,35
9–10 баллов (сопор)	8	10,81	5	6,76	3	4,05
6–8 баллов (умеренная кома)	31	41,89	23	31,08	8	10,81
4–5 баллов (глубокая кома)	25	33,78	13	17,57	12	16,22
3 балла (терминальная кома)	1	1,35	0	0	1	1,35
Всего	74		48	64,86	26	35,14

Во время нахождения пациентов в стационаре центра нейрохирургии, в остром периоде ЧМТ (1–30 дней после травмы), пациентам была выполнена МРТ на 3,0 Тл МР-томографе General Electric Signa HDxt (GE Healthcare, США) с использованием 8-канальной головной катушки. Протокол исследования включал стандартные последовательности: аксиальные T1, T2, T2-FLAIR (толщина среза 5 мм, зазор 1 мм), DWI ($b = 1000 \text{ с/мм}^2$) и SWAN (толщина среза 1 мм, зазор 0 мм). Для последовательности T1 также использовался режим T1 FSPGR BRAVO с изотропным вокселем 1 мм. Помимо рутинных последовательностей МРТ проводилось сканирование в режимах ДТ МРТ, HARDI-CSD и T2 CUBE.

Реконструкция кортикоспинальных и аркуатных трактов была выполнена с помощью двух алгоритмов трактографии: детерминистического (регрессионного) и вероятностного.

Детерминистический (регрессионный) алгоритм построения трактов (алгоритм FACT) основан на получении данных ДТ МРТ. Для получения ДТ МРТ использовали импульсную последовательность DWI SE EPI в аксиальной проекции со следующими пара-

метрами: TR = 8000 мс, TEmin = 96 мс, направления диффузионного градиента и повторы — 33/2; FOV = 256/256 мм; толщина среза/зазор, мм — 4–5/0; поле обзора, см/размер вокселя (мм^3) — 24/1,9 × 1,9 × 4. ДТ МРТ выполняли для 33 направлений диффузионного градиента, после чего данные пересылались на рабочую станцию Advantage 4.3, оснащенную специализированным программным обеспечением для обработки трактографии. Измерение проводилось для одного значения диффузионных весов (b-фактора): 1000 с/мм^2 . Время сбора данных для ДТ МРТ составило 5 мин.

В качестве дополнительного метода к основной ДТ МРТ применялась вероятностная реконструкция трактов с использованием алгоритма HARDI-CSD. Данные HARDI-CSD получали с использованием SE DWI EPI-последовательности. Основные параметры сканирования: TR = 12 000 мс, TE — min, матрица 256 × 256, толщина среза 2,5 мм без зазоров, FOV = 22 × 22 – 26 × 26 см^2 , b-фактор = 2500 с/мм^2 . В программе MRtrix3 вычислялись все тракты мозга с заданными параметрами: алгоритмом из работы Tournier J. и соавт. (2012) [12], максимальной длиной трактов 200 мм и лимитом в 5 млн волокон. Полученные

траектории затем импортировались в TrackVis для реконструкции и визуализации трактов путем выделения областей интереса (ROI).

Для реконструкции кортикоспинальных трактов на цветовых картах трактографии области интереса были выделены на уровне моста мозга (рис. 1, а) и в прецентральных извилинах в аксиальной проекции (рис. 1, б). Для реконструкции аркуатных трактов области интереса были выделены на уровне боковых желудочков во фронтальной проекции (рис. 1, в) и в височной области в сагиттальной проекции (рис. 1, г).

Исследовался усредненный параметр FA на всем протяжении тракта для оценки целостности кортикоспинальных и аркуатных пучков в обоих полушариях мозга.

Оценка неврологического дефицита (двигательные и речевые нарушения) проводилась через 3 мес и более после травмы с целью сопоставления усредненного параметра FA в отдельном тракте и клинических данных.

При сборе анамнеза использовался тест Американской академии физической терапии и реабилитации — Шкала функциональной независимости (FIM — Functional Independence Measure).

Шкала функциональной независимости (FIM) состоит из 18 пунктов, отражающих состояние двигательных и интеллектуальных функций, которая

оценивается наблюдателем в баллах от 1 до 7. Суммарная оценка может составлять от 18 до 126 баллов: чем выше суммарная оценка, тем полнее независимость больного в повседневной жизни. В представленной работе шкала FIM была дополнена четырьмя дополнительными вопросами, на которые требовались простые ответы «да» или «нет»:

1. Есть ли нарушения движения и функции в левой руке?
2. Есть ли нарушения движения и функции в правой руке?
3. Есть ли нарушения движения и функции в левой ноге?
4. Есть ли нарушения движения и функции в правой ноге?

Пациенты с суммарным баллом менее 100 были отнесены к неблагоприятному исходу, с баллом выше 100 — к благоприятному.

По данным катанеза для ROC-анализа сформированы 8 групп сравнения: здоровые добровольцы и все пациенты с ДАП; пациенты с благоприятным и неблагоприятным исходами по FIM, а также группы с изолированными и сочетанными двигательными и речевыми нарушениями в различных комбинациях.

Статистический анализ данных проведен с помощью языка статистического программирования и среды R (версия 3.6.1) в IDE RStudio (версия 1.3.1093). Распределение непрерывных и дискретных количественных переменных в вы-

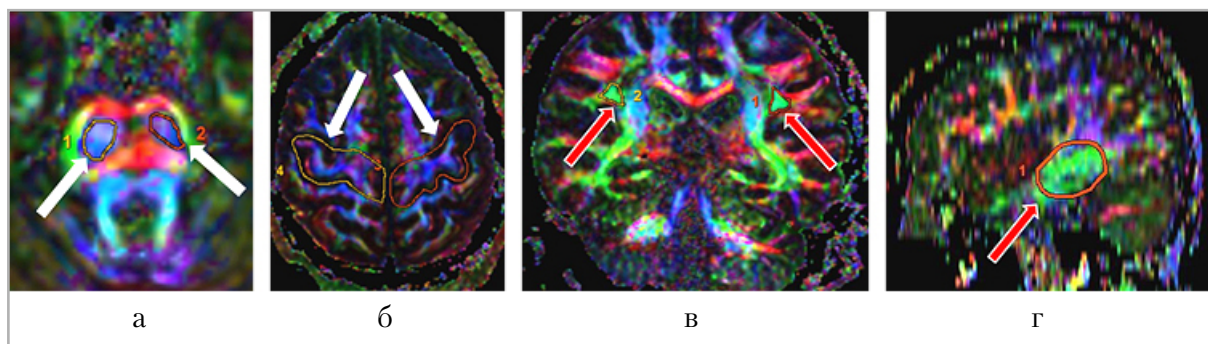


Рис. 1. Цветовая карта трактографии. Белыми стрелками указаны ROI для построения кортикоспинальных трактов с обеих сторон (на уровне моста (а) и прецентральных извилин (б)), красными — для аркуатных (на уровне боковых желудочков во фронтальной проекции (в) и в височной области в сагиттальной проекции (г))

борке представлены как среднее арифметическое и стандартное отклонение ($M \pm SD$) для нормально распределенных случайных величин, медиана и квартили ($Me [Q1; Q3]$) для величин, распределение которых отличается от нормального. Категориальные показатели представлены как абсолютное число и процентное соотношение ($n, \%$).

Соответствие выборки нормальному распределению определялось с помощью теста Шапиро — Уилка. Тестирование статистических гипотез о различии в распределении количественных переменных в независимых выборках проводили с помощью метода Манна — Уитни. Различия в распределениях категориальных переменных в независимых выборках тестировали с помощью критерия Хи-квадрат и точного критерия Фишера. Нулевую гипотезу в статистических тестах отклоняли при уровне значимости $p < 0,05$. Статистическая обработка проводилась в программе [R-project](#), для ROC-анализа использовалась библиотека pROC.

Результаты

В результате исследования были определены усредненные параметры FA на всем протяжении кортикоспинальных и аркуатных трактов с обеих сторон у 12 здоровых добровольцев и 74 пациентов с ДАП в остром периоде с различными клиническими и функциональными исходами.

Для количественной оценки диагностической ценности параметра FA в дифференциации исследуемых групп был проведен ROC-анализ. Были сформированы следующие пары групп:

- 1) здоровые добровольцы и все пациенты с ДАП (независимо от исхода);
- 2) пациенты с благоприятным и неблагоприятным исходом по шкале FIM;
- 3) здоровые добровольцы и пациенты с двигательными нарушениями;
- 4) здоровые добровольцы и пациенты с речевыми нарушениями;

- 5) пациенты без двигательных нарушений и с двигательными нарушениями;
- 6) пациенты без речевых нарушений и с речевыми нарушениями;
- 7) здоровые добровольцы и пациенты с сочетанными двигательными и речевыми нарушениями;
- 8) пациенты без неврологических нарушений и пациенты с сочетанными двигательными и речевыми нарушениями.

Для каждого из указанных сравнений были рассчитаны площадь под ROC-кривой (AUC), чувствительность, специфичность и определен оптимальный пороговый уровень параметра FA (табл. 2).

При сравнении здоровых добровольцев и пациентов с ДАП были получены исключительно высокие показатели диагностической эффективности: для кортикоспинальных трактов $UC = 0,98-0,99$, чувствительность 91–100 %, специфичность 93–94 % при пороговом значении $FA = 0,54$; для аркуатных трактов $AUC = 0,90-0,92$, чувствительность 83–92 %, специфичность 85–88 % при пороговом значении $FA = 0,44-0,45$.

При сравнении пациентов с благоприятным и неблагоприятным исходом были выявлены достоверные различия усредненного параметра FA на всем протяжении кортикоспинальных и аркуатных трактов (для левого и правого кортикоспинального тракта $p < 0,001$, для левого аркуатного тракта $p = 0,007$, для правого аркуатного тракта $p = 0,003$) (рис. 2). Результаты ROC-анализа показали умеренную диагностическую эффективность параметра FA для оценки структурных изменений. Для кортикоспинальных трактов были получены следующие показатели: $AUC = 0,76$, чувствительность — 69 %, специфичность — 73 % с оптимальным порогом FA в диапазоне 0,47–0,49. Для аркуатных трактов диагностическая ценность была несколько ниже: AUC варьировала от 0,69 до

Таблица 2

**Данные ROC-анализа усредненного параметра
фракционной анизотропии (FA) у 8 сравниваемых групп***

Сравниваемые группы	Тракты	AUC	Чувств., %	Специф., %	Оптимальный порог FA	p-value
Здоровые добровольцы vs пациенты с ДАП (независимо от исхода)	КСТ	0,98–0,99	91–100	93–94	0,54	< 0,001
	АрТ	0,90–0,92	83–92	85–88	0,44–0,45	< 0,001
ДАП: Благоприятный vs неблагоприятный исход (FIM)	КСТ	0,76	69	73	0,47–0,49	< 0,001
	АрТ	0,69–0,71	62–79	62–64	0,39	0,003–0,007
Здоровые добровольцы vs двигательные нарушения	КСТ	0,98–0,99	100	95	0,53	< 0,001
Здоровые добровольцы vs речевые нарушения	АрТ	0,95	92–100	89	0,43	< 0,001
ДАП: Без двигательных нарушений vs. с двигательными нарушениями	КСТ (Л)	0,78	68	83	0,47	< 0,001
	КСТ (П)	0,75	74	67	0,5	< 0,001
ДАП: Без речевых нарушений vs. с речевыми нарушениями	АрТ (Л)	0,68	89	48	0,42	< 0,001
	АрТ (П)	0,73	75	65	0,4	< 0,001
Здоровые добровольцы vs ДАП с сочетанными неврологическими нарушениями	КСТ	0,99	100	96	0,52–0,53	< 0,001
	АрТ	0,94–0,95	92	87–91	0,43–0,44	< 0,001
ДАП без неврологических нарушений vs сочетанные нарушения	КСТ (Л)	0,86	83	77	0,48	< 0,001
	КСТ (П)	0,81	70	80	0,49	< 0,001
	АрТ (Л)	0,74	87	60	0,42	< 0,001
	АрТ (П)	0,76	78	77	0,4	< 0,001

Примечание: * – зеленым цветом показана высокая диагностическая информативность усредненного параметра FA; желтым – хорошая; оранжевым – умеренная; красным – ограниченная. КСТ – кортикоспинальный тракт; АрТ – аркуатный тракт; Л – левый; П – правый.

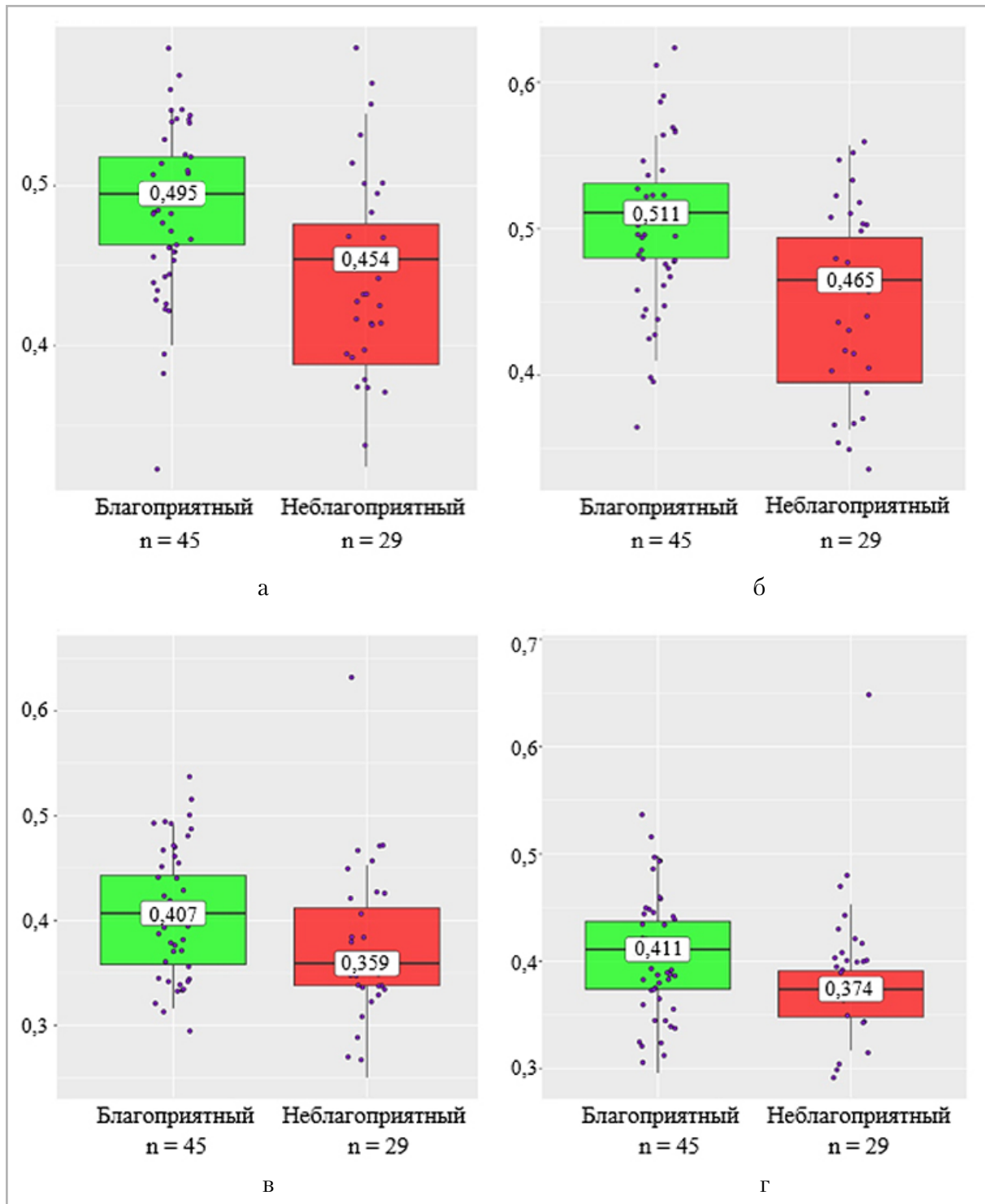


Рис. 2. Диаграмма размаха, демонстрирующая усредненный параметр FA в кортикоспинальных (а – левого, б – правого) и аркуатных (в – левого, г – правого) трактах у пациентов с благоприятным и неблагоприятным исходом

0,71, чувствительность – от 62 до 79 %, специфичность – от 62 до 64 % при пороговом значении FA = 0,39 (рис. 3).

Были выявлены статистически значимые различия усредненного параметра

FA ($p < 0,001$) кортикоспинальных трактов у пациентов без и с двигательными нарушениями верхних и/или нижних конечностей (рис. 4). Результаты ROC-анализа указывают на умерен-

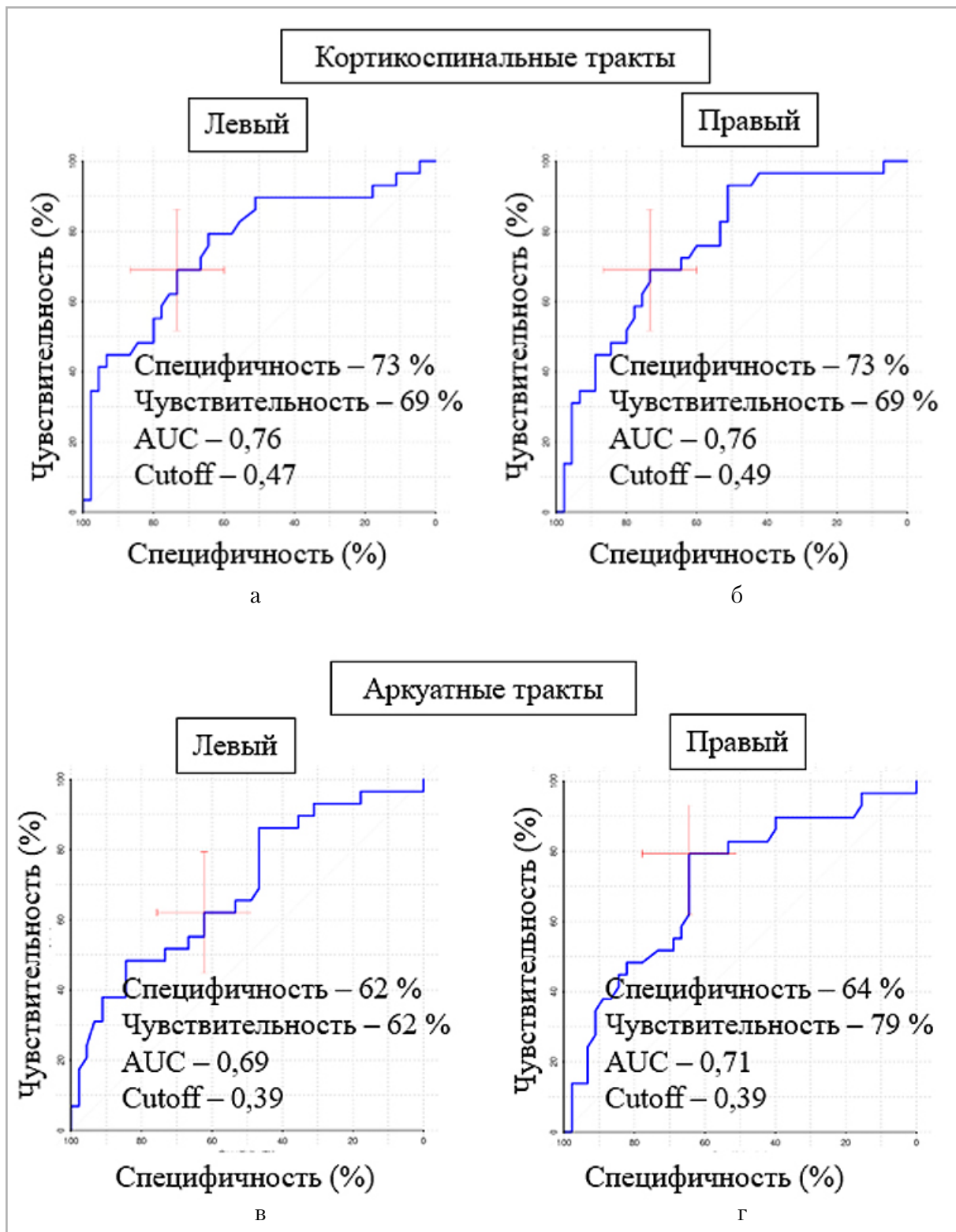


Рис. 3. ROC-кривая: специфичность, чувствительность, площадь под кривой и пороговые значения параметра FA для левых и правых кортикоспинальных (а, б) и аркуатных трактов (в, г) у пациентов с благоприятным и неблагоприятным исходом

ную диагностическую эффективность параметра FA, что подтверждается значениями площади под ROC-кривой

(AUC: 0,78 для левого и 0,75 для правого трактов), а также показателями чувствительности (68 и 74 % соответственно)

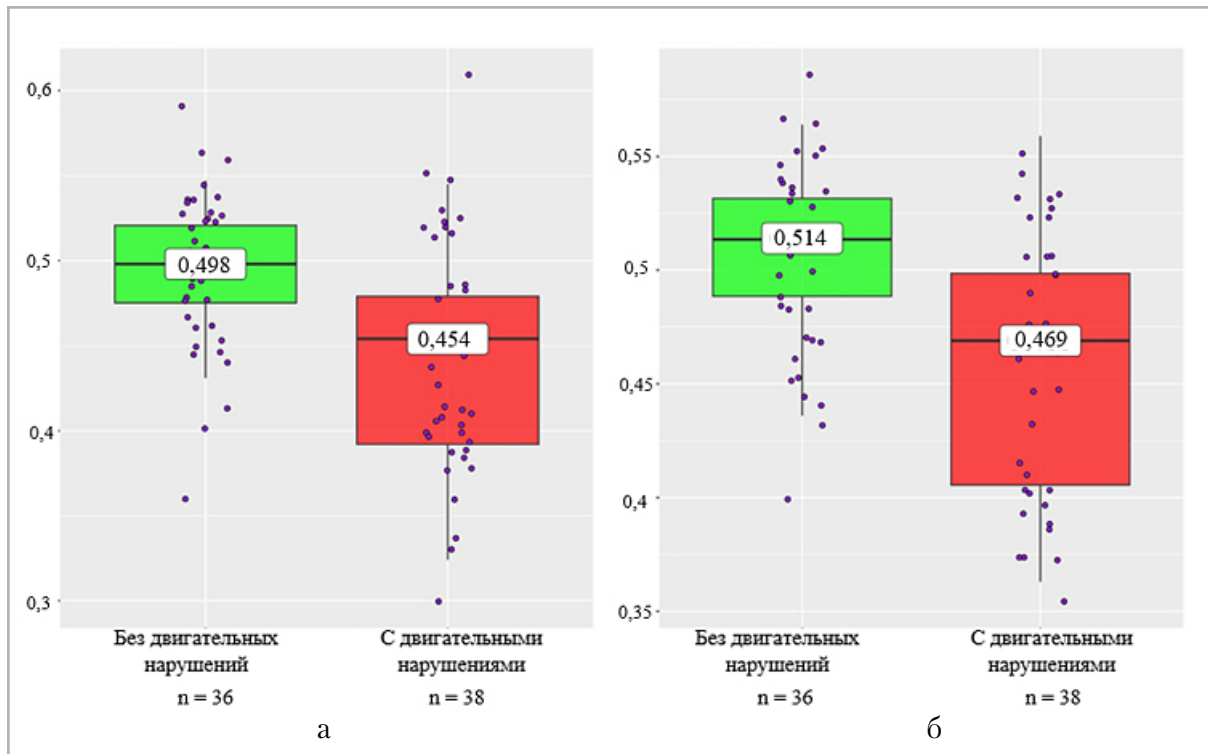


Рис. 4. Диаграмма размаха, демонстрирующая усредненный параметр FA в кортикоспинальных (*а* – левого, *б* – правого) трактах у пациентов без и с двигательными нарушениями верхних и/или нижних конечностей

и специфичности (83 и 67 % соответственно) при оптимальных пороговых значениях 0,47 для левого и 0,5 для правого (рис. 5).

Выявлены статистически значимые различия усредненного параметра FA аркуатных трактов у пациентов без и с речевыми нарушениями (рис. 6).

Результаты ROC-анализа показали умеренную диагностическую эффективность параметра FA. Для правой стороны значения составили: AUC 0,73, чувствительность 75 % и специфичность 65 % при пороговом значении 0,4 (рис. 7). Для левой стороны диагностическая ценность параметра оказалась ограниченной: при AUC 0,68 чувствительность была высокой (89 %), однако специфичность оказалась низкой (48 %) при пороге 0,42. Параметр FA демонстрирует асимметричную диагностическую эффективность, проявляя более точные характеристики для правого аркуатного тракта.

Также были выявлены статистически значимые различия усредненного параметра FA ($p < 0,001$) в кортикоспинальных и аркуатных трактах у пациентов без функциональных нарушений и с комбинацией двигательных и речевых нарушений (рис. 8).

Результаты ROC-анализа показали высокую диагностическую эффективность параметра FA для оценки структурных изменений. Для кортикоспинальных трактов были получены следующие показатели: AUC 0,86 для левого и 0,81 для правого, чувствительность 83 % для левого и 70 % для правого, специфичность 77 % для левого и 80 % для правого с оптимальным порогом FA в диапазоне 0,48–0,49. Для аркуатных трактов диагностическая точность AUC варьировала от 0,74 до 0,76, чувствительность 87 % для левого и 78 % для правого, специфичность 60 % для левого и 77 % для правого при пороговом значении FA = 0,4–0,42 (рис. 9).

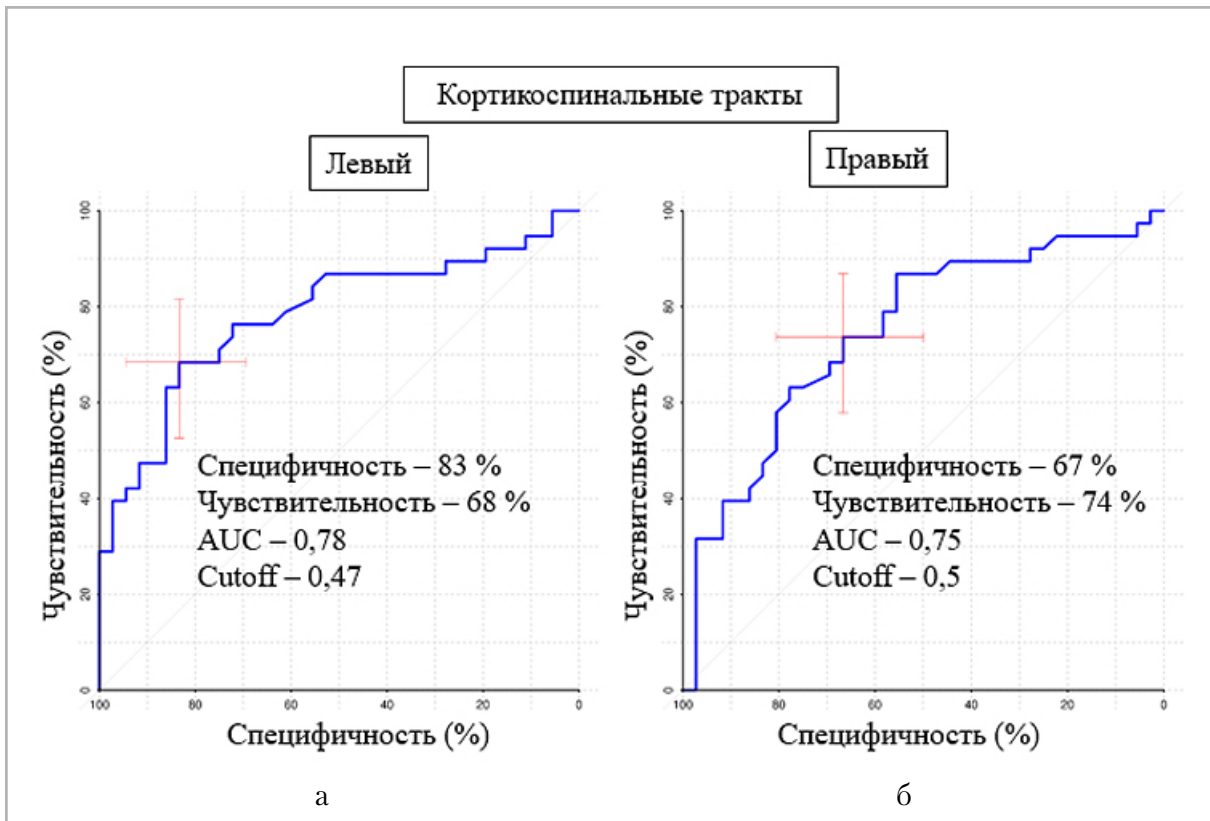


Рис. 5. ROC-кривая: специфичность, чувствительность, площадь под кривой и пороговые значения параметра FA для левого (а) и правого (б) кортикоспинальных трактов у пациентов без и с двигательными нарушениями верхних и/или нижних конечностей

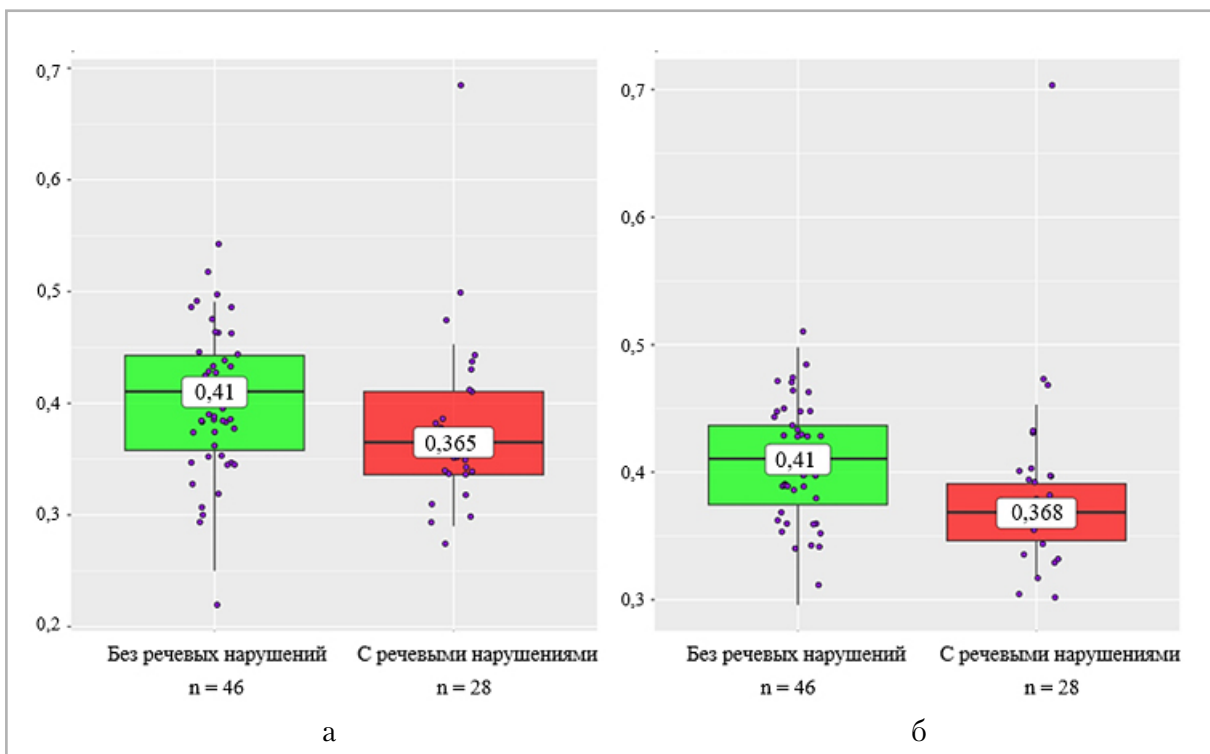


Рис. 6. Диаграмма размаха, демонстрирующая усредненный параметр FA в аркуатных (а – левого ($p = 0,011$), б – правого ($p < 0,001$)) трактах у пациентов без и с речевыми нарушениями

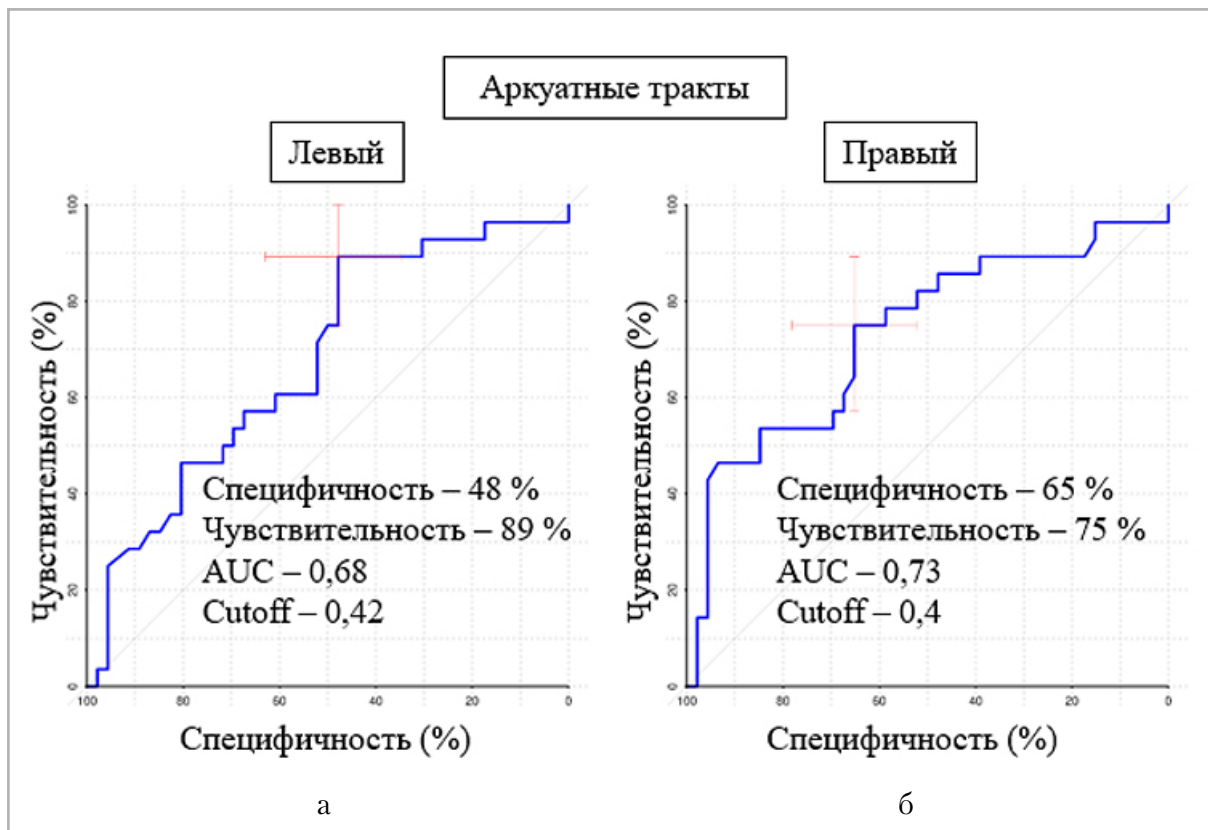


Рис. 7. ROC-кривая: специфичность, чувствительность, площадь под кривой и пороговые значения параметра FA для левого (а) и правого (б) аркуатных трактов у пациентов без и с речевыми нарушениями

Обсуждение

Фракционная анизотропия (FA) является важным параметром в ДТ МРТ, который используется для оценки целостности белого вещества в головном мозге. Параметр FA показывает степень анизотропии (направленности) диффузионного эллипсоида в вокселях, таким образом определяя диффузию молекул воды вдоль трактов белого вещества (аксонов и миелиновых листков). FA позволяет исследовать микроструктурные изменения в белом веществе, что особенно актуально для пациентов с диффузными повреждениями. Определение изменений параметра FA может помочь в ранней диагностике и мониторинге восстановления пациентов после травмы головного мозга. Кортикоспинальные и аркуатные тракты играют ключевую роль в двигательной и речевой функциях, и их повреждение может оказывать

значительное влияние на клинические исходы.

С момента внедрения ДТ МРТ более 20 лет назад во многих исследованиях изучали изменения кортикоспинальных и аркуатных трактов у пациентов с ЧМТ [2, 5, 6, 9, 14]. Исследования показывают, что у пациентов с ЧМТ наблюдается значительное снижение FA в кортикоспинальных и аркуатных трактах по сравнению со здоровыми добровольцами. Например, в работе Jang S. и соавт. (2016) [5] авторы исследовали повреждения кортикоспинальных трактов у 53 пациентов с легкой ЧМТ с помощью ДТ МРТ. Авторы обнаружили, что снижение FA в кортикоспинальных трактах коррелирует с двигательными нарушениями у пациентов с ЧМТ. Это согласуется с результатами нашей работы и данными других исследований, которые также демонстрируют, что по-

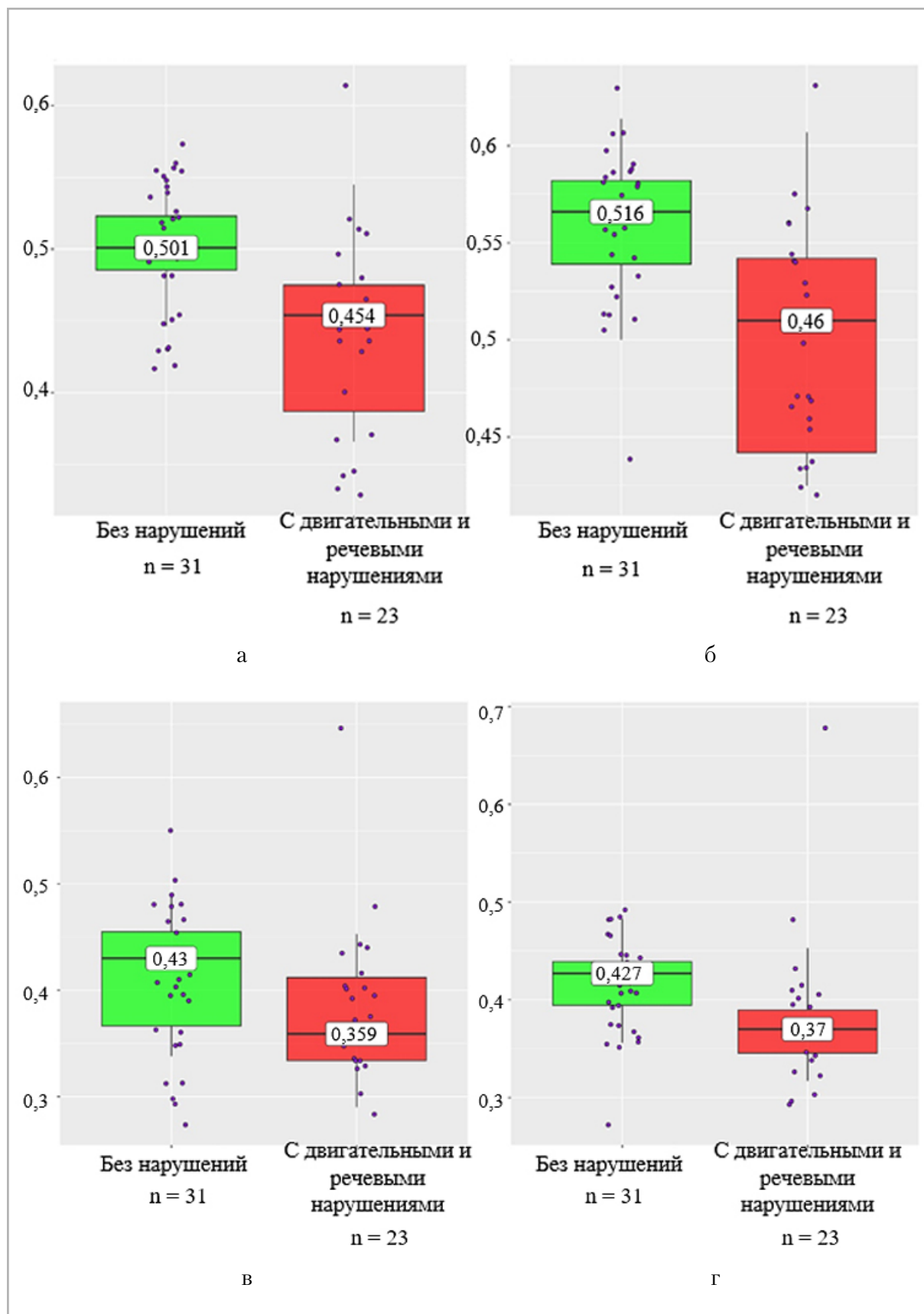


Рис. 8. Диаграмма размаха, демонстрирующая усредненный параметр FA в кортикоспинальных (а – левого, б – правого) и аркуатных (в – левого (p = 0,003), г – правого) трактах у пациентов без неврологического дефицита и пациентов с двигательными и речевыми нарушениями

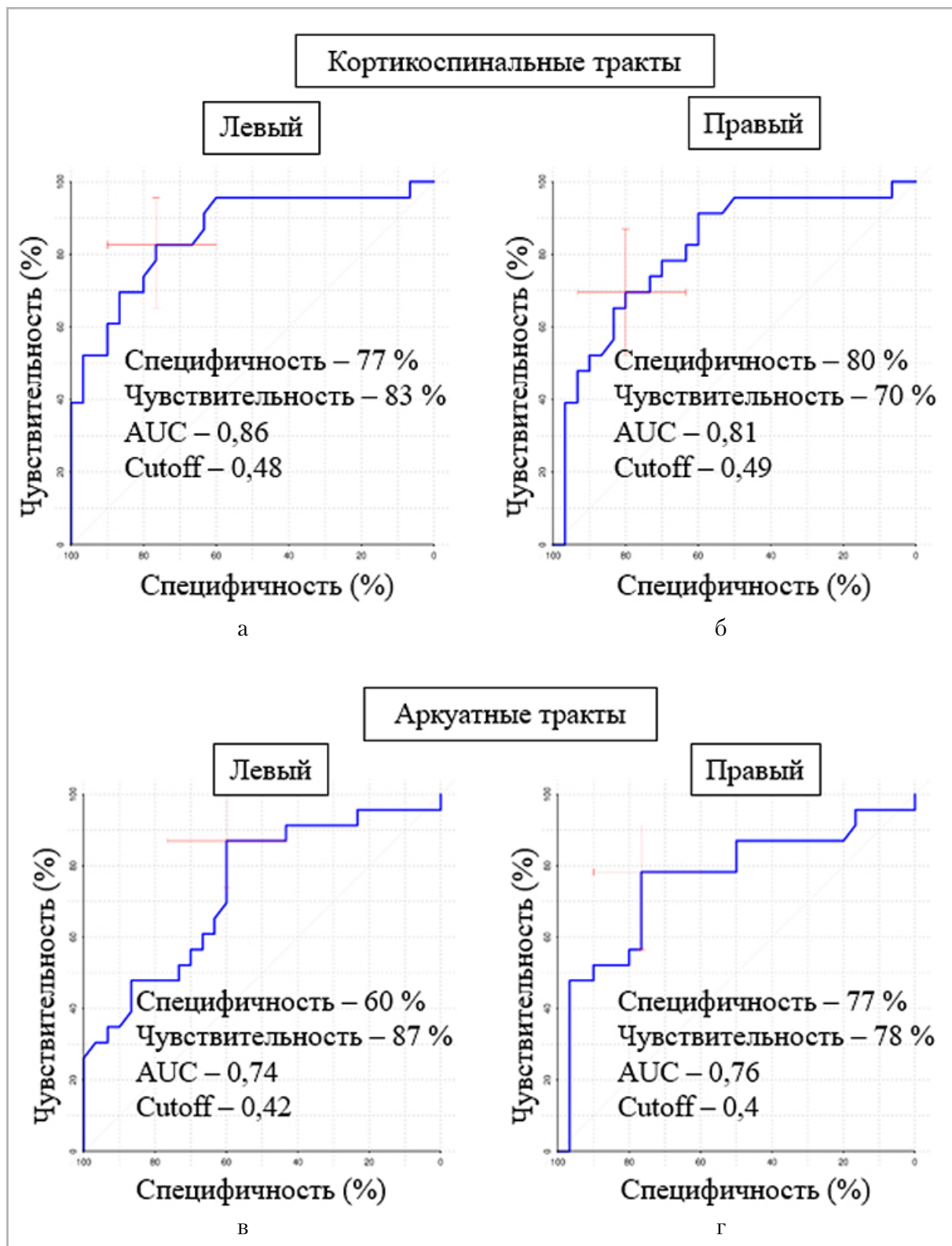


Рис. 9. ROC-кривая: специфичность, чувствительность, площадь под кривой и пороговые значения параметра FA для левых и правых кортикоспинальных (а, б) и аркуатных трактов (в, г) у пациентов без неврологического дефицита и пациентов с двигательными и речевыми нарушениями

вреждение кортикоспинальных трактов, приводящее к ухудшению моторных

функций, возможно достоверно оценить с помощью ДТ МРТ. В 2010 г. Singh M.

и соавт. определили, что значение параметра FA при анализе зон интереса по всей длине кортикоспинальных трактов было снижено у пациентов ЧМТ легкой и средней степени тяжести [11].

Однако только в нескольких из этих работ исследовали повреждение кортикоспинальных трактов у пациентов с ДАП [2, 7, 14].

В работе Захаровой Н. Е. и соавт. (2010) [2] оценивалась роль ДТ МРТ в диагностике и прогнозировании тяжелого ДАП. В исследовании участвовали 22 пациента с ДАП и 8 здоровых добровольцев. Пациенты в остром периоде были в коме (4–8 баллов по ШКГ), у части из них был гемипарез или тетрапарез. Через 6 месяцев результаты лечения оценивались по шкале исходов Глазго (ШИГ). Анализ показателей FA выявил значимые изменения в проводящих путях белого вещества. У пациентов без двигательных нарушений отмечалось умеренно выраженное снижение FA по всей длине кортикоспинальных трактов, а у пациентов с гемипарезом и тетрапарезом – выраженное снижение FA на уровне заднего бедра внутренней капсулы и ножек мозга. Показатели FA в мозолистом теле и пирамидных трактах коррелировали с клиническими исходами, особенно у пациентов, обследованных в остром периоде ДАП (на 10–17-е сутки травмы).

В исследовании Jang S. и соавт. (2020) [6] была попытка изучить частоту и локализацию повреждения кортикоспинальных трактов у пациентов с ДАП с помощью ДТ МРТ. Исследовалась группа из 14 пациентов, у которых выявлены двигательные нарушения конечностей без какого-либо визуального изменения МР-сигнала по всей длине кортикоспинальных трактов на стандартной МРТ головного мозга, и 12 здоровых добровольцев. Параметр FA был получен с использованием ROI на различных уровнях по всей длине трактов. У всех пациентов было более одного

очага повреждения кортикоспинальных трактов, а среднее количество повреждений трактов составило 3,6 (диапазон 2–7). Наиболее частыми локализациями поражений кортикоспинальных трактов стали мост (61 %), ножки мозга (39 %), лучистый венец (21 %), продолговатый мозг (14 %) и задняя ножка внутренней капсулы (11 %).

Аркуатный тракт играет ключевую роль в речевой функции, включая понимание и формирование речи [4]. Изменения FA в аркуатных трактах у пациентов с ЧМТ связаны с их повреждением. Точная оценка состояния аркуатных трактов у пациентов с нарушениями речи после ЧМТ имеет важное клиническое значение, поскольку она будет полезна врачам для определения точной стратегии реабилитации и прогнозирования возможного восстановления речи [7].

Большинство исследований аркуатных трактов с помощью ДТ МРТ были сосредоточены на пациентах с инсультом. Что касается ЧМТ, то удалось найти только два исследования, в которых сообщалось о повреждении аркуатного тракта [9, 14].

В 2009 г. Wesson A. и соавт. описали случай пациента с легкой ЧМТ, у которого развилась моторная афазия. С помощью ДТ МРТ была выявлена атрофия левого аркуатного тракта после взрывной травмы [14]. Это исследование стало одним из первых, продемонстрировавших связь между повреждением аркуатного тракта и речевыми нарушениями у пациентов с ЧМТ.

Liegeois F. и соавт. (2013) провели исследование, в котором изучили речевую функцию и параметры ДТ МРТ у 32 пациентов с легкой и средней тяжестью ЧМТ. Они анализировали состояние аркуатного тракта, крючковидного пучка и мозолистого тела. Результаты исследования показали, что речевые нарушения после ЧМТ можно прогнозировать по изменениям FA [9]. Это исследование

стало первым, в котором изучалось повреждение аркуатного тракта у группы пациентов с легкой ЧМТ. Несмотря на важность этих исследований, следует учитывать несколько ограничений: в исследовании Liegeois F. и соавт. участвовало относительно мало пациентов, кроме того, отсутствовали динамические исследования с использованием ДТ МРТ.

Представленная работа является первым оригинальным исследованием с количественным анализом повреждений кортикоспинальных и аркуатных трактов на всем протяжении после их трехмерной реконструкции у пациентов с ДАП. Преимуществом нашего исследования является изучение однородной и достаточно крупной ($n = 74$) группы пациентов с ДАП. При этом нами были получены достоверные различия параметра FA не только у пациентов с ДАП и здоровых добровольцев, но и у пациентов с благоприятным и неблагоприятным функциональным исходом. Практическая значимость этих находок была количественно оценена с помощью ROC-анализа, который продемонстрировал высокую диагностическую эффективность параметра FA. На основе этого анализа были установлены четкие пороговые значения FA, позволяющие с высокой точностью различать группы сравнения. Таким образом, полученные данные предоставляют надежный инструмент для объективной оценки повреждения проводящих путей при ДАП.

Сравнение параметра FA кортикоспинальных и аркуатных трактов у здоровых добровольцев и пациентов с ЧМТ показало значительные различия, которые связаны с аксональным повреждением, демиелинизацией и глиозом. Это объясняется тем, что после диффузного повреждения происходит прямое повреждение аксонов, активация глии и воспалительные процессы, что может способствовать нарушению структурной целостности белого вещества. Таким

образом, параметр FA может служить биомаркером для оценки тяжести травмы и прогнозирования восстановления.

Исходя из изложенного, представленная работа показала, что FA является важным показателем, позволяющим оценить изменения в кортикоспинальных и аркуатных трактах у пациентов с ЧМТ, и ДАП в частности. Достоверность различий показателей FA у здоровых добровольцев и пациентов с ДАП, а также у пациентов с благоприятными и неблагоприятными функциональными исходами по FIM подчеркивает значимость этого параметра в клинической практике, а также возможность его применения для прогноза восстановления двигательных и речевых функций после травмы.

Выводы

Исследование кортикоспинальных и аркуатных трактов методом ДТ МРТ и HARDI-CSD показало, что параметр FA обладает высокой диагностической ценностью для выявления структурных повреждений проводящих путей при ДАП и прогнозирования функциональных исходов.

Список источников

1. Афандиев Р. М., Захарова Н. Е., Погосбемян Э. Л., Потапов А. А., Пронин И. Н. Диффузионно-тензорная и диффузионно-куртозисная магнитно-резонансная томография в оценке диффузного аксонального повреждения (обзор литературы) // Радиология – практика. 2022. № 1. С. 77–90. DOI
2. Захарова Н. Е., Потапов А. А., Корниенко В. Н., Пронин И. Н., Зайцев О. С., Гаврилов А. Г., Фадеева Л. М., Ошоров А. В., Сычев А. А., Такуш С. В. Динамическое исследование структуры мозолистого тела и кортикоспинальных трактов с помощью диффузионно-тензорной магнитно-резонансной томографии при диффузном аксональном повреждении // «Вопросы нейрохи-

- рургии» имени Н. Н. Бурденко. 2010. Т. 3. С. 3–9.
3. Захарова Н. Е., Потапов А. А., Пронин И. Н., Данилов Г. В., Александрова Е. В., Фадеева Л. М., Погосбекян Э. Л., Баталов А. И. Изменения параметров диффузионно-куртозисной МРТ у пациентов с диффузным аксональным повреждением // «Вопросы нейрохирургии» имени Н. Н. Бурденко. 2019. Т. 3. С. 5–16. [DOI](#)
 4. Dick A. S., Tremblay P. Beyond the arcuate fasciculus: consensus and controversy in the connectional anatomy of language. *Brain*. 2012;135(Pt 12):3529-50. [DOI](#)
 5. Jang S. H., Kim S. Y. Injury of the Corticospinal Tract in Patients with Mild Traumatic Brain Injury: A Diffusion Tensor Tractography Study. *J. Neurotrauma*. 2016;33(19):1790-1795. [DOI](#)
 6. Jang S. H., Seo Y. S. Difference between injuries of the corticospinal tract and corticoreticulospinal tract in patients with diffuse axonal injury: a diffusion tensor tractography study. *Int. J. Neurosci*. 2020;130(2):124-129. [DOI](#)
 7. Kim S. H., Jang S. H. Prediction of aphasia outcome using diffusion tensor tractography for arcuate fasciculus in stroke. *AJNR Am. J. Neuroradiol*. 2013;34(4):785-90. [DOI](#)
 8. Krieg J. L., Leonard A. V., Turner R. J., Corrigan F. Identifying the Phenotypes of Diffuse Axonal Injury Following Traumatic Brain Injury. *Brain Sci*. 2023;13(11):1607. [DOI](#)
 9. Liégeois F. J., Mahony K., Connelly A., Pigdon L., Tournier J. D., Morgan A. T. Pediatric traumatic brain injury: language outcomes and their relationship to the arcuate fasciculus. *Brain Lang*. 2013;127(3):388-98. [DOI](#)
 10. Mormina E., Longo M., Arrigo A., Alafaci C., Tomasello F., Calamuneri A., Marino S., Gaeta M., Vinci S. L., Granata F. MRI Tractography of Corticospinal Tract and Arcuate Fasciculus in High-Grade Gliomas Performed by Constrained Spherical Deconvolution: Qualitative and Quantitative Analysis. *AJNR Am. J. Neuroradiol*. 2015;36(10):1853-8. [DOI](#)
 11. Singh M., Jeong J., Hwang D., Sungkarat W., Gruen P. Novel diffusion tensor imaging methodology to detect and quantify injured regions and affected brain pathways in traumatic brain injury. *Magn. Reson. Imaging*. 2010;28(1):22-40. [DOI](#)
 12. Tournier J., Calamante F., Connelly A. MRtrix: Diffusion tractography in crossing fiber regions. *International Journal of Imaging Systems and Technology*. 2012;22(1):53-66. [DOI](#)
 13. Wallace E. J., Mathias J. L., Ward L. Diffusion tensor imaging changes following mild, moderate and severe adult traumatic brain injury: a meta-analysis. *Brain Imaging Behav*. 2018 Dec;12(6):1607-1621. [DOI](#)
 14. Wesson A. J., Yu Zhang A. R., Wang Han, Kasprisin A., Martinson S., Cheng J., Weiner M., Yesavage J. A., Folio L. Mild traumatic brain injury and conduction aphasia from a close proximity blast resulting in arcuate fasciculus damage diagnosed on DTI tractography. *Mil Med*. 2009;174(11):v-vi.

References

1. Afandiev R. M., Zakharova N. E., Pogosbekyan E. L., Potapov A. A., Pronin I. N. Diffusion-tensor and Diffusion-kurtosis Magnetic Resonance Imaging in the Assessment of Diffuse Axonal Injury (Literature Review). *Radiology – Practice*. 2022;(1):77-90. (In Russ.). [DOI](#)
2. Zakharova N. E., Potapov A. A., Kornienko V. N., Pronin I. N., Zaytsev O. S., Gavrilov A. G., Fadeeva L. M., Oshorov A. V., Sychev A. A., Takush S. V. Dynamic assessment of corpus callosum and corticospinal tracts structure using diffusion-tensor MRI in diffuse axonal injury. *Burdenko's Journal of Neurosurgery*. 2010;(3):3-9. (In Russ.).
3. Zakharova N. E., Potapov A. A., Pronin I. N., Danilov G. V., Alexandrova E. V., Fadeeva L. M., Pogosbekyan E. L., Bata-

- lov A. I. Diffusion kurtosis imaging in diffuse axonal injury. *Burdenko's Journal of Neurosurgery*. 2019;83(3):5-16. (In Russ.). [DOI](#)
4. Dick A. S., Tremblay P. Beyond the arcuate fasciculus: consensus and controversy in the connectional anatomy of language. *Brain*. 2012;135(Pt 12):3529-50. [DOI](#)
 5. Jang S. H., Kim S. Y. Injury of the Corticospinal Tract in Patients with Mild Traumatic Brain Injury: A Diffusion Tensor Tractography Study. *J. Neurotrauma*. 2016;33(19):1790-1795. [DOI](#)
 6. Jang S. H., Seo Y. S. Difference between injuries of the corticospinal tract and corticoreticulospinal tract in patients with diffuse axonal injury: a diffusion tensor tractography study. *Int. J. Neurosci*. 2020;130(2):124-129. [DOI](#)
 7. Kim S. H., Jang S. H. Prediction of aphasia outcome using diffusion tensor tractography for arcuate fasciculus in stroke. *AJNR Am. J. Neuroradiol*. 2013;34(4):785-90. [DOI](#)
 8. Krieg J. L., Leonard A. V., Turner R. J., Corrigan F. Identifying the Phenotypes of Diffuse Axonal Injury Following Traumatic Brain Injury. *Brain Sci*. 2023;13(11):1607. [DOI](#)
 9. Liégeois F. J., Mahony K., Connelly A., Pigdon L., Tournier J. D., Morgan A. T. Pediatric traumatic brain injury: language outcomes and their relationship to the arcuate fasciculus. *Brain Lang*. 2013;127(3):388-98. [DOI](#)
 10. Mormina E., Longo M., Arrigo A., Alafaci C., Tomasello F., Calamuneri A., Marino S., Gaeta M., Vinci S. L., Granata F. MRI Tractography of Corticospinal Tract and Arcuate Fasciculus in High-Grade Gliomas Performed by Constrained Spherical Deconvolution: Qualitative and Quantitative Analysis. *AJNR Am. J. Neuroradiol*. 2015;36(10):1853-8. [DOI](#)
 11. Singh M., Jeong J., Hwang D., Sungkarat W., Gruen P. Novel diffusion tensor imaging methodology to detect and quantify injured regions and affected brain pathways in traumatic brain injury. *Magn. Reson. Imaging*. 2010;28(1):22-40. [DOI](#)
 12. Tournier J., Calamante F., Connelly A. MRtrix: Diffusion tractography in crossing fiber regions. *International Journal of Imaging Systems and Technology*. 2012; 22(1):53-66. [DOI](#)
 13. Wallace E. J., Mathias J. L., Ward L. Diffusion tensor imaging changes following mild, moderate and severe adult traumatic brain injury: a meta-analysis. *Brain Imaging Behav*. 2018 Dec;12(6):1607-1621. [DOI](#)
 14. Wesson A. J., Yu Zhang A. R., Wang Han, Kasprisin A., Martinson S., Cheng J., Weiner M., Yesavage J. A., Folio L. Mild traumatic brain injury and conduction aphasia from a close proximity blast resulting in arcuate fasciculus damage diagnosed on DTI tractography. *Mil Med*. 2009;174(11):v-vi.

Сведения об авторах / Information about the authors

Афандиев Рамин Малик оглы, врач отделения рентгеновских и радиоизотопных методов диагностики ФГАУ «НМИЦ нейрохирургии им. ак. Н. Н. Бурденко» Минздрава России, Москва, Россия.

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

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

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

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

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, Chief Research Fellow, Department of X-ray and Radioisotope Diagnostic Methods, N. N. Burdenko National Medical Research Center of Neurosurgery, Ministry of Healthcare of Russia, Moscow, Russia.

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.

Погосбемян Эдуард Леонидович, медицинский физик отделения рентгеновских и радиоизотопных методов диагностики ФГАУ «НМИЦ нейрохирургии им. ак. Н. Н. Бурденко» Минздрава России, Москва, Россия. Вклад автора: статистический анализ данных.

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, Moscow, Russia.

Author's contribution: statistical data analysis.

Баталов Артем Игоревич, кандидат медицинских наук, старший научный сотрудник отделения рентгеновских и радиоизотопных методов диагностики ФГАУ «НМИЦ нейрохирургии им. ак. Н. Н. Бурденко» Минздрава России, Москва, Россия.

Вклад автора: разработка дизайна исследования.

Batalov Artem Igorevich, Ph. D. Med., Senior Research Fellow, Department of X-ray and Radioisotope Diagnostic methods, N. N. Burdenko National Medical Research Center of Neurosurgery, Ministry of Healthcare of Russia, Moscow, Russia.

Author contributions: development of the research design.

Царукаев Батрадз Ацамазович, нейрохирург ФГАУ «НМИЦ нейрохирургии им. ак. Н. Н. Бурденко» Минздрава России, Москва, Россия.

Вклад автора: сбор полученных данных и разработка дизайна исследования.

Tsarukaev Batradz Atsamazovich, Neurosurgeon N. N. Burdenko National Medical Research Center of Neurosurgery, Ministry of Healthcare of Russia, Moscow, Russia.

Author's contribution: performing data collection and developing the study design.

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

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, Moscow, Russia.

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.

Статья поступила в редакцию 25.11.2025;
одобрена после рецензирования 16.12.2025;
принята к публикации 17.12.2025.

The article was submitted 25.11.2025;
approved after reviewing 16.12.2025;
accepted for publication 17.12.2025.