

УДК 616.833.34-009.11-053.2-073.756.8  
DOI: <https://doi.org/10.17816/PTORS630087>

Оригинальное исследование



# Диффузионно-тензорная магнитно-резонансная томография у пациентов с последствиями односторонней родовой травмы плечевых сплетений

А.М. Ходоровская<sup>1</sup>, А.Ю. Ефимцев<sup>2</sup>, О.Е. Агранович<sup>1</sup>, М.В. Савина<sup>1</sup>, В.И. Зорин<sup>1</sup>,  
С.А. Брайлов<sup>1</sup>, А.И. Аракелян<sup>1</sup>, С.А. Лукьянов<sup>1</sup>, А.С. Грищенко<sup>2,3</sup>, Я.А. Филин<sup>2</sup>,  
Д.Б. Вчерашний<sup>4</sup>, В.В. Морозова<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Национальный медицинский исследовательский центр детской травматологии и ортопедии имени Г.И. Турнера, Санкт-Петербург, Россия;

<sup>2</sup> Национальный медицинский исследовательский центр имени В.А. Алмазова, Санкт-Петербург, Россия;

<sup>3</sup> Северо-Западный окружной научно-клинический центр имени Л.Г. Соколова, Санкт-Петербург, Россия;

<sup>4</sup> Физико-технический институт имени А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

## АННОТАЦИЯ

**Обоснование.** Диффузионно-тензорная магнитно-резонансная томография позволяет визуализировать проводящие пути головного мозга, спинного мозга и оценить их структуру и целостность и находит широкое применение в практической медицине. Диффузионно-тензорная магнитно-резонансная томография плечевых сплетений в настоящее время не является рутинной методикой исследования, а публикации, в которых описано использование диффузионно-тензорной магнитно-резонансной томографии плечевых сплетений у детей и подростков, единичны.

**Цель** — оценка возможности диффузионно-тензорной магнитно-резонансной томографии плечевых сплетений у пациентов детского возраста с последствиями родовой травмы плечевого сплетения, а также выявление корреляционных связей между параметрами диффузионно-тензорной магнитно-резонансной томографии плечевых сплетений и показателями электрофизиологического исследования верхних конечностей у данных пациентов.

**Материалы и методы.** Проведено комплексное обследование 50 пациентов. Основная группа: 30 пациентов в возрасте от 6 до 17 ( $9,8 \pm 1,4$ ) лет с контрактурами и вторичными деформациями плечевого сустава вследствие односторонней родовой травмы плечевого сплетения. Контрольная группа: 20 пациентов в возрасте от 7 до 17 ( $10,1 \pm 2,1$ ) лет без клинических признаков и анамнестических данных, указывающих на повреждение плечевого сплетения и периферических нервов верхних конечностей.

**Результаты.** В контрольной группе не обнаружено статистически значимых различий параметров диффузионно-тензорной магнитно-резонансной томографии правого и левого плечевого сплетения. Определены статистически значимые различия фракционной анизотропии трактов C<sub>5</sub>–C<sub>8</sub> на стороне поврежденного плечевого сплетения, по сравнению с этим показателем на стороне неповрежденного плечевого сплетения. На стороне поврежденного плечевого сплетения выявлены нелинейные корреляционные связи между фракционной анизотропией трактов спинномозгового нерва и его ветвей и амплитудой сенсорного ответа от сенсорного нерва, который исходит от ветвей данного спинномозгового нерва, а также между объемом ветвей трактов спинномозгового нерва и амплитудой вызванных моторных ответов от мышц, источником иннервации которых являлись ветви данного спинномозгового нерва.

**Заключение.** Диффузионно-тензорная магнитно-резонансная томография позволяет оценить структурные изменения спинномозговых нервов, участвующих в формировании плечевого сплетения. Результаты данной работы могут быть использованы для дальнейших исследований диффузионно-тензорной магнитно-резонансной томографии плечевых сплетений при различной патологии у детей.

**Ключевые слова:** родовая травма плечевого сплетения; повреждение плечевого сплетения; диффузионно-тензорная магнитно-резонансная томография; трактография.

## Как цитировать

Ходоровская А.М., Ефимцев А.Ю., Агранович О.Е., Савина М.В., Зорин В.И., Брайлов С.А., Аракелян А.И., Лукьянов С.А., Грищенко А.С., Филин Я.А., Вчерашний Д.Б., Морозова В.В. Диффузионно-тензорная магнитно-резонансная томография у пациентов с последствиями односторонней родовой травмы плечевых сплетений // Ортопедия, травматология и восстановительная хирургия детского возраста. 2024. Т. 12. № 2. С. 185–196. DOI: <https://doi.org/10.17816/PTORS630087>

Рукопись получена: 08.04.2024

Рукопись одобрена: 14.06.2024

Опубликована online: 26.06.2024



DOI: <https://doi.org/10.17816/PTORS630087>

Original Study Article

# Diffusion-tensor magnetic resonance imaging in patients with consequences of obstetric brachial plexus palsy

Alina M. Khodorovskaya<sup>1</sup>, Aleksandr Yu. Efimtsev<sup>2</sup>, Olga E. Agranovich<sup>1</sup>, Margarita V. Savina<sup>1</sup>, Vyacheslav I. Zorin<sup>1</sup>, Sergey A. Braylov<sup>1</sup>, Anastasiia I. Arakelian<sup>1</sup>, Sergey A. Lukyanov<sup>1</sup>, Aleksandr S. Grishchenkov<sup>2,3</sup>, Yana A. Filin<sup>2</sup>, Daniil B. Vcherashniy<sup>4</sup>, Victoria V. Morozova<sup>1</sup>

<sup>1</sup> H. Turner National Medical Research Center for Children's Orthopedics and Trauma Surgery, Saint Petersburg, Russia;

<sup>2</sup> Almazov National Medical Research Centre, Saint Petersburg, Russia;

<sup>3</sup> Sokolov' North-Western Regional Scientific and Clinical Center, Saint Petersburg, Russia;

<sup>4</sup> Ioffe Physical Technical Institute, Saint Petersburg, Russia

## ABSTRACT

**BACKGROUND:** Diffusion-tensor magnetic resonance imaging allows visualizing the conductive pathways of the brain and spinal cord and assessing their structure and integrity and has found wide application in practical medicine. Currently, brachial plexus diffusion-tensor magnetic resonance imaging is not a routine research technique, and very few studies have described its use in children and adolescents.

**AIM:** This study aimed to evaluate the possibility of brachial plexus diffusion-tensor magnetic resonance imaging application in pediatric patients with obstetric brachial plexus palsy sequelae and identify correlations between the diffusion-tensor magnetic resonance imaging parameters of brachial plexus and parameters of electrophysiological study of the upper extremities in these patients.

**MATERIALS AND METHODS:** A complex examination of 50 patients was performed. The main group included 30 patients aged 6–17 years, with contractures and secondary deformities of the bones of the shoulder girdle and upper limbs caused by unilateral obstetric brachial plexus palsy. The control group included 20 patients aged 7–17 ( $10.1 \pm 2.1$ ) years without clinical signs, and anamnestic data indicated the presence of damage to the brachial plexus and peripheral nerves of the upper limbs.

**RESULTS:** No significant differences in diffusion-tensor magnetic resonance imaging parameters of the right and left brachial plexus were found in the control group. Significant differences in fractional anisotropy of the C<sub>5</sub>–C<sub>8</sub> tracts on the side of the damaged brachial plexus were detected compared with those on the side of the undamaged brachial plexus. On the side of the injured brachial plexus, nonlinear correlations were found between the fractional anisotropy of the tracts of the spinal nerve and its branches and the amplitude of sensory responses from the sensory nerve, which originated from the anterior branches of this spinal nerve, and between the volume of the branches of the tracts of the spinal nerve and the amplitude of compound motor responses from the muscles, which were innervated by the anterior branches of this spinal nerve.

**CONCLUSIONS:** Diffusion-tensor magnetic resonance imaging allows for the evaluation of the structural changes in the SNs that participate in the formation of the brachial plexus. The results can be used for further studies of diffusion-tensor magnetic resonance imaging of brachial plexuses in various pathologies in pediatric patients.

**Keywords:** obstetric brachial plexus palsy; brachial plexus injury; diffusion-tensor magnetic resonance imaging; tractography.

## To cite this article

Khodorovskaya AM, Efimtsev AYu, Agranovich OE, Savina MV, Zorin VI, Braylov SA, Arakelian AI, Lukyanov SA, Grishchenkov AS, Filin YaA, Vcherashniy DB, Morozova VV. Diffusion-tensor magnetic resonance imaging in patients with consequences of obstetric brachial plexus palsy. *Pediatric Traumatology, Orthopaedics and Reconstructive Surgery*. 2024;12(2):185–196. DOI: <https://doi.org/10.17816/PTORS630087>

Received: 08.04.2024

Accepted: 14.06.2024

Published online: 26.06.2024

## ОБОСНОВАНИЕ

Родовые повреждения плечевого сплетения, по данным разных авторов, встречаются в соотношении от 0,38 до 5,1 на 1000 новорожденных [1]. Клиническая картина родовой травмы плечевого сплетения у новорожденного не специфична и не коррелирует с тяжестью повреждения и прогнозом [2]. В 30–90 % случаев отмечается полное спонтанное восстановление утраченных функций верхней конечности [3]. Сроки восстановления функции верхней конечности зависят от характера повреждения и определяют дальнейшее лечение и прогноз [3, 4]. Один из возможных механизмов повреждения плечевого сплетения в родах — длительное (минуты или даже часы) низкоэнергетическое растяжение корешков и стволов плечевого сплетения, приводящее к широкому спектру повреждений от нейропраксии до аксонотмезиса и нейротмезиса, с частичным или полным поражением стволов плечевого сплетения. Для детей с тяжелыми последствиями родовой травмы плечевого сплетения типично формирование внутривольных невром поврежденных нервных стволов. В дальнейшем часть аксональных волокон прорастает, что обуславливает появление движений в поврежденной верхней конечности в 6–12 мес. и позже [5, 6]. В отличие от тракционного повреждения плечевого сплетения у взрослых, при котором в большинстве случаев отмечаются отрывы корешков спинномозговых нервов, формирующих плечевое сплетение, авульсия корешков спинномозговых нервов у детей с последствиями родовой травмы встречается значительно реже [4].

У детей с последствиями родовой травмы плечевого сплетения в виде неполного восстановления и нарушения функций верхней конечности различной степени выраженности наблюдаются укорочение верхней конечности на стороне поврежденного сплетения, а также ограничение амплитуды движения в суставах вследствие множественных контрактур мышц, деформации суставов, что определяет медико-социальную значимость проблемы [7, 8].

При повреждении плечевого сплетения золотым стандартом диагностики является электрофизиологическое обследование, которое позволяет выявить степень и характер повреждения нервных стволов [9]. В то же время в связи с анатомической вариабельностью формирования плечевого сплетения и наличием перекрестной иннервации, а также при изолированном повреждении  $C_5$ ,  $C_6$  [10, 11] с помощью данной методики невозможно определить точную локализацию повреждения.

При повреждении плечевых сплетений, для уточнения диагноза, используются различные методы визуализации, такие как ультразвуковое исследование, компьютерная томография или магнитно-резонансная томография (МРТ). В настоящее время МРТ — основной метод визуализации плечевого сплетения за счет высокой специфичности при различных патологических состояниях [12, 13]. Магнитно-резонансная нейрография получила широкое

применение для диагностики поражения плечевого сплетения благодаря своей неинвазивности и возможности анализа проксимальных и дистальных отделов плечевого сплетения. Несмотря на то что МР-нейрография заменила КТ-миелографию, которую долгое время использовали для выявления преганглионарных повреждений, данный метод не позволяет количественно оценить выявленные структурные изменения [13, 14].

На сегодняшний день перспективной методикой нейровизуализации является диффузионно-тензорная МРТ (ДТ МРТ), которая позволяет получить количественную характеристику диффузии молекул воды в различных биологических тканях. Это возможно благодаря математической реконструкции векторов и значений диффузии молекул воды в исследуемой зоне и последующего графического отображения преимущественной траектории их движения [15]. Эта методика также позволяет проводить количественный анализ особенностей структуры периферических нервных волокон путем расчета параметров диффузии, таких как фракционная анизотропия (ФА), радиальная (РД) и аксиальная диффузивность (АД), а также дает представление о функциональном состоянии аксонов [14]. Однако в настоящее время ДТ МРТ плечевых сплетений не является рутинной методикой исследования, а публикации, в которых описана ДТ МРТ плечевых сплетений у детей и подростков, практически отсутствуют в мировой литературе [14, 16].

**Цель** — оценка возможности применения ДТ МРТ плечевых сплетений у пациентов детского возраста с последствиями родовой травмы плечевого сплетения и анализ воспроизводимости результатов ДТ МРТ, а также выявление корреляционных связей между параметрами ДТ МРТ плечевых сплетений и показателями электрофизиологического исследования верхних конечностей у пациентов с последствиями родовой травмы плечевого сплетения.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В работу включены 30 пациентов с контрактурами и вторичными деформациями плечевого сустава вследствие односторонней родовой травмы плечевого сплетения в возрасте от 6 до 17 лет ( $9,8 \pm 1,4$  года), которым не проводили микрохирургическое восстановление целостности поврежденных стволов плечевого сплетения. Мальчиков было 16, девочек — 14. Критерием диагностики повреждения плечевого сплетения являлось электрофизиологическое обследование.

Критерии исключения из исследования: двустороннее повреждение плечевого сплетения, сопутствующие генетические и системные заболевания, отсутствие добровольного информированного согласия пациентов и их представителей на участие в данном исследовании, необходимость анестезиологического пособия для проведения МРТ, двигательные артефакты при МРТ, не позволяющие осуществить постпроцессинговую обработку данных ДТ МРТ.

В связи с отсутствием в отечественной и зарубежной литературе данных референтных значений параметров ДТ МРТ у детей возникла необходимость их определения. В наше исследование была включена контрольная группа, состоящая из 20 пациентов (12 мальчиков 8 девочек) в возрасте от 7 до 17 лет ( $10,1 \pm 2,1$  года) с последствиями травмы плечевого или локтевого сустава, которым в необходимый протокол обследования МРТ по основному заболеванию дополнительно была включена МРТ-последовательность для получения данных ДТ МРТ шейного отдела спинного мозга и проксимальных отделов плечевых сплетений.

Критерии включения в контрольную группу: отсутствие клинических признаков и анамнестических данных, указывающих на повреждения плечевого сплетения различного генеза, возраст от 7 до 17 лет. Критерии исключения: сопутствующие генетические и системные заболевания, отсутствие добровольного информированного согласия пациентов и их представителей на участие в данном обследовании, необходимость анестезиологического пособия, двигательные артефакты при проведении МРТ, не позволяющие осуществить постпроцессинговую обработку данных ДТ МРТ.

Всем пациентам проведено комплексное обследование, включающее подробный анализ данных анамнеза, неврологический и ортопедический осмотр, ДТ МРТ плечевых сплетений. Электрофизиологическое обследование выполняли только пациентам основной группы.

Электрофизиологическое обследование осуществляли на четырехканальном электронейромиографе «НейроМВП-4» («Нейрософт», Россия), анализировали параметры сенсорных ответов при стимуляции наружного кожного нерва предплечья, срединного, локтевого и поверхностного лучевого нервов с обеих сторон, скорость проведения импульса по сенсорным волокнам, исследовали вызванные моторные ответы, а также скорость проведения импульса по моторным волокнам при стимуляции подмышечного, мышечно-кожного, срединного, локтевого и лучевого нервов с обеих сторон по стандартной методике [17].

МРТ выполняли на томографе Philips Ingenia Edition X с силой индукции магнитного поля 3,0 Тесла (12-канальная катушка — DS-Head-Neck) в положении пациента лежа на спине. Протокол исследования включал диффузионно-тензорные изображения в аксиальной плоскости. Срезы ориентированы перпендикулярно средней линии тела. Количество срезов — 23, толщина среза — 3 мм, промежуток между срезами — 0, матрица —  $64 \times 62$  мм, размер вокселя —  $2,8 \times 2,8$  мм, поле обзора (FOV) —  $180 \times 180$  мм, время повторения (TR) — 4000 мс, время эхо (TE) — 71 мс, количество усреднений — 2, коэффициент диффузии (b) —  $600 \text{ с/мм}^2$ , применяли 15 направлений диффузии, время исследования — 8 мин 30 с. По данным localizer выполняли позиционирование срезов: с середины тела позвонка C<sub>3</sub> до середины тела позвонка Th<sub>2</sub>. Постпроцессинговую обработку проводили в программе DSI Studio

с встроенными методами статистического анализа. Зонами интереса (ROI) для трактограмм C<sub>5</sub>–Th<sub>1</sub> были выбраны попарно симметричные зоны выхода спинномозговых нервов из межпозвоночных отверстий. Каждую трактограмму строили отдельно. По выбранной зоне интереса строили тракты со следующими параметрами: максимальное значение фракционной анизотропии — 0,18; максимальное значение угла поворота — 45°; без ограничения по минимальной длине и количеству трактов. Использовали стандартную цветовую индикацию. Для оценки воспроизводимости выполнено трехкратное построение трактограмм плечевых сплетений у 15 случайно выбранных пациентов контрольной группы и 30 пациентов основной группы.

*Статистический анализ.* Полученные в процессе выполнения работы данные проанализировали с помощью программы StatTech v.2.8.8 (разработчик — ООО «Статтех», Россия). Для описания числовых шкал были использованы среднее значение и стандартное отклонение в формате  $M \pm SD$ . Две группы по числовым переменным сравнивали с помощью непараметрического критерия Манна – Уитни. Сравнение трех групп и более по количественному признаку осуществлялось с применением критерия Краскела – Уоллиса с дополнительным апостериорным сравнением с использованием критерия Данна с поправкой Холма.

Корреляции между параметрами ДТ МРТ и электрофизиологического исследования оценивали с применением коэффициента корреляции Спирмена. При нелинейной корреляционной связи выборку делили на части, в которых связь монотонная, вычисляли корреляции отдельно для каждой части выборки. Повторяемость параметров трактографии плечевых сплетений анализировали с помощью критерия альфа-Кронбаха.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

У 20 пациентов контрольной группы построены 160 (100 %) трактов C<sub>5</sub>–C<sub>8</sub> спинномозговых нервов и их ветвей (СН), 21 (52,5 %) тракт СН Th<sub>1</sub>. У пациентов с последствиями односторонней родовой травмы плечевого сплетения на стороне неповрежденных плечевых сплетений — 120 (100 %) трактов СН C<sub>5</sub>–C<sub>8</sub> и 18 (56,7 %) трактов СН Th<sub>1</sub>, на стороне поврежденных плечевых сплетений — 114 (95 %) трактов СН C<sub>5</sub>–C<sub>8</sub> и 14 (46,7 %) трактов СН Th<sub>1</sub>.

Повторяемость построения трактов СН была хорошей ( $>0,8$ ) в контрольной группе и в основной группе на стороне неповрежденного плечевого сплетения; приемлемой ( $>0,7$ ) в основной группе на стороне поврежденного плечевого сплетения (табл. 1).

При повторных построениях количество трактов СН в контрольной и основной группах не изменялось. Отсутствие построенных трактов C<sub>5</sub>–C<sub>8</sub> мы расценивали как авульсию (рис. 1). И это соответствовало данным электрофизиологического обследования.

В связи с тем что достоверно оценить причину отсутствия построения тракта СН Th<sub>1</sub> не представлялось воз-

**Таблица 1.** Коэффициент альфа-Кронбаха (повторяемость построения трактов спинномозговых нервов)

Корешки спинномозговых нервов и их ветвей	Группа определения референтных значений ДТ МРТ	Пациенты с последствиями односторонней родовой травмы плечевого сплетения	
		на стороне неповрежденного плечевого сплетения	на стороне поврежденного плечевого сплетения
C <sub>5</sub>	0,89	0,9	0,81
C <sub>6</sub>	0,87	0,87	0,79
C <sub>7</sub>	0,86	0,85	0,76
C <sub>8</sub>	0,89	0,87	0,84
Th <sub>1</sub>	0,88	0,89	0,85

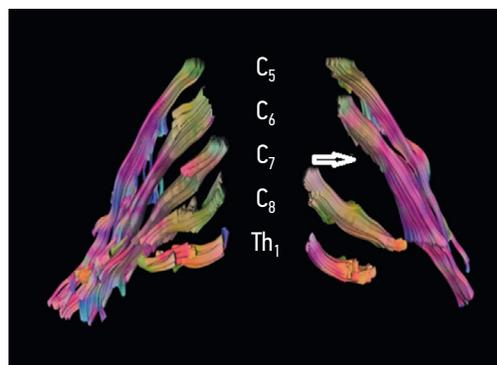
возможным (отрыв или технические сложности при его построении), данные параметров трактов СН Th<sub>1</sub> были исключены из дальнейшего анализа.

При анализе данных ДТ МРТ плечевых сплетений не было выявлено статистически значимых различий ( $p > 0,05$ ) показателей ФА, АД, РД, МД между правым и левым плечевыми сплетениями в контрольной группе (табл. 2), а также данными этих показателей на стороне неповрежденного плечевого сплетения у пациентов из основной группы.

Не было обнаружено статистически значимых гендерных и возрастных различий ( $p > 0,05$ ) вышеуказанных показателей как в контрольной группе, так и у пациентов с последствиями односторонней родовой травмы плечевого сплетения на стороне неповрежденного плечевого сплетения. Это позволило провести сравнительный анализ параметров ДТ МРТ на стороне поврежденного и неповрежденного плечевых сплетений без учета латерализации, возрастных и гендерных различий.

Отмечены статистически значимые различия ( $p < 0,05$ ) ФА трактов СН C<sub>5</sub>–C<sub>8</sub> контрольной и основной групп (на стороне поврежденного плечевого сплетения) (рис. 2).

В основной группе (на стороне поврежденного плечевого сплетения) по сравнению с данными контрольной группы отмечены статистически значимые различия ФА трактов СН C<sub>5</sub> у 27 (90 %) пациентов, трактов C<sub>6</sub> — у 26 (86,6 %), трактов C<sub>7</sub> — у 24 (80 %), трактов C<sub>8</sub> — у 9 (30 %).



**Рис. 1.** Пациент К., 11 лет. Трехмерная реконструкция трактов спинномозговых нервов. Парез Эрба слева. Отсутствие СН C<sub>7</sub> указано стрелкой

Не было выявлено статистически значимых различий ( $p = 0,08$ ) между АД, РД, МД контрольной и основной групп как на стороне поврежденного, так и неповрежденного плечевого сплетения.

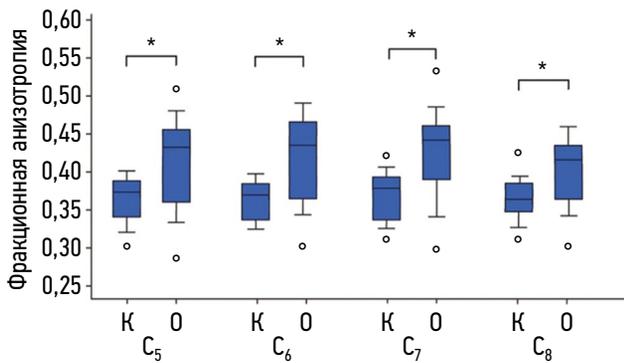
Не было обнаружено взаимосвязей между изменением ФА трактов СН и амплитудой моторных ответов от мышцы, иннервируемой этим СН на стороне поврежденного плечевого сплетения.

На стороне поврежденного плечевого сплетения была выявлена нелинейная корреляционная связь между ФА трактов СН и амплитудой сенсорного ответа от сенсорного нерва, который исходит от ветвей данного спинномозгового нерва. Сильная отрицательная корреляционная

**Таблица 2.** Параметры диффузионно-тензорной магнитно-резонансной томографии правого и левого плечевого сплетения пациентов контрольной группы и неповрежденного плечевого сплетения пациентов с последствиями родовой травмы плечевого сплетения (без учета латерализации)

Корешки спинномозговых нервов	ФА*			МД*			АД*			РД*		
	п	л	н	п	л	н	п	л	н	п	л	н
C <sub>5</sub>	0,38 ± 0,012	0,37 ± 0,017	0,37 ± 0,013	1,59 ± 0,17	1,58 ± 0,14	1,6 ± 0,1	2,07 ± 0,09	2,04 ± 0,07	2,09 ± 0,07	1,44 ± 0,15	1,48 ± 0,19	1,49 ± 0,17
C <sub>6</sub>	0,37 ± 0,017	0,36 ± 0,02	0,36 ± 0,017	1,61 ± 0,13	1,57 ± 0,15	1,59 ± 0,07	2,05 ± 0,13	2,11 ± 0,06	2,11 ± 0,12	1,61 ± 0,11	1,52 ± 0,17	1,58 ± 0,13
C <sub>7</sub>	0,37 ± 0,016	0,37 ± 0,018	0,36 ± 0,011	1,62 ± 0,08	1,59 ± 0,12	1,61 ± 0,15	2,12 ± 0,06	2,09 ± 0,13	2,09 ± 0,13	1,54 ± 0,09	1,59 ± 0,01	1,5 ± 0,17
C <sub>8</sub>	0,35 ± 0,016	0,36 ± 0,014	0,36 ± 0,09	1,58 ± 0,13	1,6 ± 0,17	1,62 ± 0,11	2,07 ± 0,11	2,09 ± 0,08	2,05 ± 0,01	1,59 ± 0,17	1,56 ± 0,12	1,52 ± 0,18

*Примечание:* п — правое плечевое сплетение у пациентов из контрольной группы; л — левое плечевое сплетение у пациентов из контрольной группы; н — неповрежденное плечевое сплетение пациентов с последствиями родовой травмы плечевого сплетения; \* отсутствие статистически значимых различий  $p > 0,05$ .



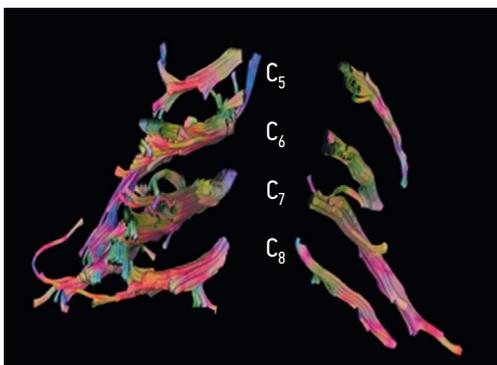
**Рис. 2.** Фракционная анизотропия трактов спинномозговых нервов  $C_5$ – $Th_1$ . К — контрольная группа; О — основная группа (на стороне поврежденного плечевого сплетения); \* статистически значимые различия ( $p < 0,05$ )

связь ( $r = -0,84$ ) была отмечена между повышением ФА трактов СН и снижением амплитуды сенсорного ответа от сенсорного нерва, который исходит от ветвей данного спинномозгового нерва на стороне поврежденного плечевого сплетения. Умеренная положительная корреляционная связь ( $r = 0,54$ ) определялась между снижением ФА трактов СН и снижением амплитуды сенсорного ответа от сенсорного нерва, который исходит от ветвей данного спинномозгового нерва на стороне поврежденного плечевого сплетения.

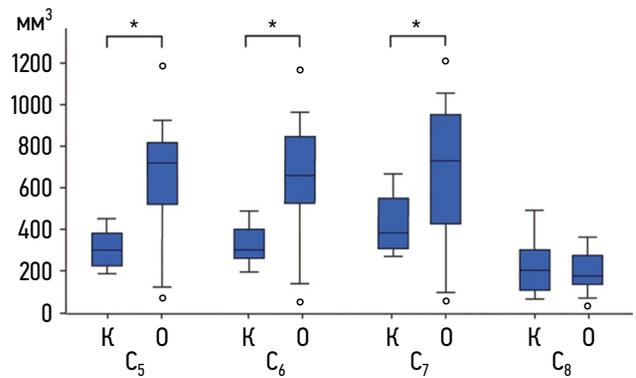
Программный пакет DSI STUDIO позволяет проводить статистический анализ, включая определение общего объема трактов, а также отдельно объема стволов и объема ветвей трактов.

Не было выявлено статистически значимых различий ( $p > 0,05$ ) общего объема трактов, объема ветвей/стволов трактов правого и левого плечевого сплетения у пациентов из контрольной группы.

Объем стволов трактов СН был снижен на стороне поврежденного плечевого сплетения, но статистически значимых различий объема стволов трактов на стороне поврежденного и неповрежденного плечевого сплетения обнаружено не было ( $p = 0,09$ ).



**Рис. 4.** Пациент В., 15 лет. Трехмерная реконструкция трактов СН  $C_5$ – $C_8$ . Повреждение левого плечевого сплетения. Уменьшение объема ветвей и стволов трактов  $C_5$ – $C_8$ . СН  $Th_1$  не построены



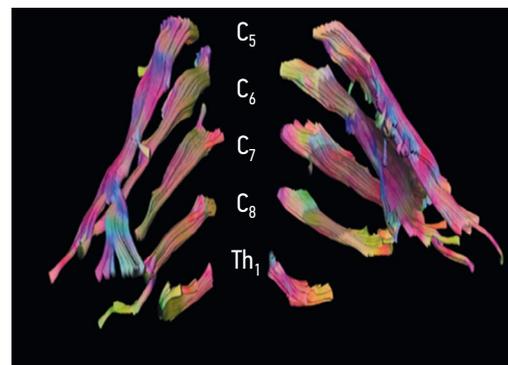
**Рис. 3.** Объем ветвей трактов спинномозговых нервов на стороне поврежденного (О) и неповрежденного плечевого сплетения (К). \* наличие статистических значимых различий между объемом ветвей трактов СН поврежденного и неповрежденного плечевого сплетения

Однако наблюдались статистически значимые различия ( $p < 0,05$ ) объема ветвей трактов СН  $C_5$ – $C_7$  на стороне поврежденного плечевого сплетения по сравнению с неповрежденным. Не отмечено статистически значимых различий объема ветвей трактов  $C_8$  (рис. 3).

Общий объем трактов СН мог быть снижен на стороне поврежденного плечевого сплетения по сравнению с неповрежденным плечевым сплетением (рис. 4) за счет уменьшения объема как ветвей, так и стволов трактов.

Общий объем трактов СН мог быть увеличен на стороне поврежденного плечевого сплетения по сравнению с неповрежденным плечевым сплетением за счет увеличения объема ветвей трактов (рис. 5).

На стороне поврежденного плечевого сплетения выявлена нелинейная корреляционная связь между объемом ветвей трактов СН и амплитудой вызванных моторных ответов от мышц, источником иннервации которых являлись ветви этого СН. Умеренная положительная корреляционная связь ( $r = 0,41$ ) определялась между уменьшением объема ветвей трактов СН и снижением амплитуды вызванных моторных ответов от мышц, источником иннервации которых служили ветви этого СН. Сильная положительная корреляционная связь ( $r = 0,84$ ) выявлена между



**Рис. 5.** Пациент М., 7 лет. Трехмерная реконструкция трактов плечевого сплетения. Парез Эрба слева. Увеличение объема ветвей трактов СН  $C_5$ – $C_7$

увеличением объема ветвей тракта СН и амплитудой вызванного моторного ответа мышц, источником иннервации которых являлись ветви этого СН.

## ОБСУЖДЕНИЕ

Диффузия воды в тканях организма может быть ограничена в большей или меньшей степени в силу биологических барьеров (мембран) или увеличения или уменьшения внеклеточного пространства [14]. Периферические нервы представляют собой высокоорганизованную структуру с многочисленными барьерами для диффузии воды, такими как эпиневррий, периневррий и эндоневрий. Периферические нервы визуализируют с использованием той же методологии, что и при исследовании трактов белого вещества в центральной нервной системе [18, 19]. ДТ МРТ плечевых сплетений позволяет осуществить трехмерную визуализацию спинномозговых нервов, участвующих в формировании плечевого сплетения, с помощью алгоритмов отслеживания, основанных на рассчитанных тензорах диффузии, получить представление о непрерывности экстрафораминальных нервных структур, формирующих плечевое сплетение [16].

Оценка воспроизводимости построения трактов (внутриэкспертное взаимодействие) в нашей работе сопоставима с данными других исследований [20, 21], но уступает им в связи с отсутствием исследования межэкспертного взаимодействия.

Затруднение построения трактов СН Th<sub>1</sub> было обусловлено различными факторами, описанными в литературе, такими как его близкое расположение к I ребру, верхушке легкого, подключичным сосудам, а также дыхательными движениями во время сканирования, которые могли вызывать неправильное отображение этого СН [16, 21, 22].

В доступной современной медицинской литературе отсутствуют сведения о значении показателей ФА, АД, РД у детей и подростков, но сообщается об отсутствии различий данных показателей между правым и левым плечевым сплетением у взрослых [20, 21, 23]. По мнению А. Tagliafico и соавт., отсутствие статистически значимых различий параметров ДТ МРТ правой и левой верхней конечности позволяет использовать параметры ДТ МРТ неповрежденной конечности при оценке монолатеральной патологии плечевых сплетений, таких как, например, односторонняя родовая травма плечевого сплетения [20].

Отсутствие гендерных различий ФА, МД, АД и РД в контрольной группе соответствует данным других авторов, которые анализировали эти параметры ДТ МРТ плечевых сплетений [22, 24], пояснично-крестцового сплетения [25] и периферических нервов [26] у взрослых без неврологической патологии.

В доступной современной литературе мы не нашли данных о возрастных различиях параметров ДТ МРТ плечевых сплетений у детей. Х. Su и соавт. при исследовании 55 добровольцев, средний возраст которых составил

40,53 ± 13,5 года, выявили слабую отрицательную корреляционную связь ( $r = -0,25$ ,  $p = 0,011$ ) между возрастом и значением ФА трактов C<sub>8</sub>, тогда как для трактов C<sub>5</sub>–C<sub>7</sub>, Th<sub>1</sub> корреляционных связей между этими параметрами обнаружено не было [23]. По данным К. Tanitame и соавт., ФА периферических нервов зависит от возраста. При исследовании ФА большеберцовых нервов у 26 здоровых обследуемых в возрасте от 23 до 69 лет авторы отметили, что до 45 лет ФА большеберцового нерва не изменяется, а после 45 лет наблюдается статистически значимое снижение этого показателя [27].

В нашем исследовании мы не учитывали влияние индекса массы тела, так как в анализируемые контрольную и основную группы были включены дети преимущественно нормостенического телосложения без признаков ожирения.

Значения ФА трактов СН C<sub>5</sub>–C<sub>8</sub> контрольной группы соответствовали данным ФА метаанализа нормативных значений ДТ МРТ, проведенного R.G. Wade и соавт. [28]. Однако ФА трактов СН C<sub>5</sub>–C<sub>8</sub> в контрольной группе была немного ниже по сравнению с данными А. Tagliafico и соавт. [20] и М. J. Но и соавт. [21]. Эти различия в ФА могут быть обусловлены техническими характеристиками МРТ-аппаратов и методикой сканирования [29, 30], отличающейся способом выбора «зоны интереса» и использованием различных методов постпроцессинговой обработки [28, 31].

Поскольку параметры ДТ МРТ обычно чувствительны к нескольким характеристикам ткани (например, миелинизации, диаметру аксона, плотности волокон, организации волокон), достоверная взаимосвязь между диффузионными МР-маркерами периферических нервов и их структурными изменениями до сих пор остается предметом дискуссий [15].

Выявленное изменение значения ФА может допускать несколько интерпретаций [32]. Снижение ФА периферических нервов, по данным литературы, отмечают у пациентов с воспалительными и компрессионными невропатиями различного генеза [33–35]. ФА снижается у пациентов после травмы периферических нервов, но после микрохирургического восстановления целостности нерва с течением времени этот параметр восстанавливается практически до исходного уровня [36]. У пациентов с последствиями родовой травмы, включенных в данное исследование, микрохирургическое восстановление целостности нервов не проводили. Снижение ФА трактов СН на стороне поврежденного плечевого сплетения, вероятно, может служить маркером неполного восстановления СН.

Авторы данной статьи предполагают, что повышения ФА СН на стороне поврежденного плечевого сплетения обусловлено локальным увеличением плотности СН за счет пролиферации соединительной ткани на фоне внутривольной невротомы. Liang Chen и соавт., которые проводили гистологическое исследование внутривольной невротомы у 28 пациентов с последствиями родовой травмы плечевого сплетения, выявили выраженную

пролиферацию эпи- и периневрия, а средний показатель регенерирующих нервных волокон в невrome составил 41,83 % (38,69–44,69 %) [37]. Необходимо учитывать, что статистический аппарат DSI STUDIO показывает усредненное значение ФА всего тракта. И полученные данные не противоречат результатам предыдущих исследований, указывающих на снижение ФА при недостаточном восстановлении периферических нервов [36, 38].

Отсутствие статистически значимых изменений АД между основной группой на стороне поврежденного плечевого сплетения и контрольной группой объясняется давностью повреждения. Согласно I.V. Manzanera Esteve и соавт., АД снижается в течение 2 нед. после травмы [39]. Радиальная диффузивность является биомаркером целостности миелиновой оболочки [40]. Отсутствие статистически значимых изменений РД между основной группой на стороне поврежденного плечевого сплетения и контрольной группой объясняется тем, что в отдаленном периоде родовой травмы плечевого сплетения скорость проведения импульса по нервным волокнам восстанавливается [41] и, следовательно, целостность миелиновой оболочки значимо не нарушена.

Объем трактов СН, формирующих плечевое сплетение, проанализирован только М. Рауеп и соавт., которые, также как и авторы данной работы, не выявили статистически значимых отличий объемов трактов правого и левого плечевого сплетения у здоровых добровольцев. По данным М. Рауеп и соавт. и в нашем исследовании, наибольший объем трактов отмечался у СН С<sub>7</sub> [42].

Согласно результатам нашего исследования, амплитуда вызванного моторного ответа от мышцы на стороне поврежденного плечевого сплетения, источником иннервации которой служили ветви этого СН, положительно коррелировала с объемом ветвей трактов этого СН. Это объясняется особенностями регенерации поврежденных нервов. При частичном повреждении нервов на любом уровне восстановление происходит за счет сохранившихся аксонов, причем последние начинают активно разрастаться и ветвиться, давая многочисленные волокна, направляющиеся к денервированным мышечным волокнам или участкам кожи. Это явление лежит в основе формирования компенсаторно-восстановительной реиннервации [43]. Однако, по сравнению с дистальными периферическими нервами, стволы плечевого сплетения дают начало значительно большему количеству ветвей, чем дистальный периферический нерв, и оценка объема ветвей трактов СН, по нашему мнению, более достоверно отражает восстановление функции СН, чем значение ФА трактов СН.

Результаты экспериментальных и клинических исследований регенерации сенсорных волокон свидетельствуют об их более медленном восстановлении по сравнению с моторными, особенно в условиях выраженного повреждения СН [41, 44, 45]. Исследование амплитуды сенсорного ответа — более чувствительный метод при оценке выра-

женности аксонального повреждения у пациентов с последствиями родовой травмы плечевого сплетения в позднем восстановительном периоде, чем анализ амплитуды моторного ответа [41, 44].

Сильная отрицательная корреляционная связь между увеличением ФА трактов СН и снижением амплитуды сенсорного ответа от сенсорного нерва, который исходит от данного СН на стороне поврежденного плечевого сплетения, вероятно, указывает на значимое повреждение СН, на фоне которого отмечалось формирование невромы и/или фиброзно-рубцовых изменений, обуславливающих увеличение ФА.

Умеренная корреляционная связь между уменьшением ФА трактов СН и снижением амплитуды сенсорного ответа от сенсорного нерва, который исходит от данного СН на стороне поврежденного плечевого сплетения, по-видимому, свидетельствует о его неполном восстановлении.

Наше исследование имело ряд ограничений. Во-первых, количество включенных в исследование пациентов было небольшим, но для выявления возможных возрастных и гендерных различий мы оценивали не только данные ДТ МРТ неповрежденного плечевого сплетения, но и параметры ДТ МРТ детей и подростков с отсутствием клинических признаков и анамнестических данных, указывающих на повреждения плечевого сплетения различного генеза. Во-вторых, мы не проводили корреляции с другими методиками визуализации, например, такими, как УЗИ плечевого сплетения. В-третьих, в связи с тем, что ДТ МРТ не является рутинной методикой и в российской научной литературе отсутствуют публикации, посвященные ДТ МРТ плечевых сплетений, мы не анализировали межэкспертную согласованность.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

ДТ МРТ плечевых сплетений воспроизводима как для здоровых детей и подростков, так и для пациентов с последствиями родовой травмы плечевого сплетения. Впервые представлены корреляции между параметрами электрофизиологического исследования и ДТ МРТ у детей с последствиями родовой травмы плечевых сплетений в позднем восстановительном периоде, указывающие на возможность оценки структурных изменений СН, формирующих плечевое сплетение. Результаты данной работы могут быть использованы для дальнейших исследований ДТ МРТ плечевых сплетений при различной патологии у детей, но их следует интерпретировать с осторожностью, так как ДТ МРТ основана на математических моделях и не исключает вероятности ошибочной интерпретации полученных данных. Необходимы дополнительные исследования для изучения возможности внедрения ДТ МРТ в рутинную клиническую практику, в том числе проведение ДТ МРТ у новорожденных с родовой травмой плечевых сплетений.

## ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

**Источник финансирования.** Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

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

**Этическая экспертиза.** Исследование одобрено локальным этическим комитетом ФГБУ «НМИЦ детской травматологии и ортопедии имени Г.И. Турнера» Минздрава России, протокол № 19-3 от 09.12.2019.

**Информированное согласие на публикацию.** Законные представители пациентов дали добровольное согласие на участие в исследовании и публикацию данных.

**Вклад авторов.** Все авторы внесли существенный вклад в проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией.

Наибольший вклад распределен следующим образом: *А.М. Ходоровская* — дизайн исследования, написание текста статьи, анализ литературных источников, реконструкция (постпроцессинговая обработка) данных диффузионно-тензорной магнитно-резонансной томографии; *А.Ю. Ефимцев* — окончательное редактирование текста статьи; *О.Е. Агранович* — дизайн исследования, редактирование текста статьи; *М.В. Савина, В.В. Морозова* — анализ и описание нейрофизиологических обследований, поиск и анализ литературных источников; *В.И. Зорин, Д.Б. Вчерашний* — этапное редактирование текста статьи; *А.С. Лукьянов, А.И. Аракелян, А.С. Грищенко, Я.А. Филлин* — поиск и анализ литературных источников; *С.А. Брайлов* — анализ и описание лучевых исследований, поиск и анализ литературы.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Lalka A., Gralla J., Sibbel S.E. Brachial plexus birth injury: epidemiology and birth weight impact on risk factors // *J Pediatr Orthop*. 2020. Vol. 140, N. 6. P. 460–465. doi: 10.1097/BPO.0000000000001447
- Leblebicioğlu G., Pondaag W. Brachial plexus birth injury: advances and controversies // *J Hand Surg Eur Vol*. 2024. Vol. 49, N. 6. P. 747–757. doi: 10.1177/17531934241231173
- Ojumah N., Ramdhan R.C., Wilson C., et al. Neurological neonatal birth injuries: a literature review // *Cureus*. 2017. Vol. 12. doi: 10.7759/cureus.1938
- Thatte M. R., Hiremath A., Nayak N., et al. Obstetric brachial plexus palsy. Diagnosis and management strategy // *J Peripheral Nerve Surg*. 2017. Vol. 1, N. 1. P. 2–9.
- Moulinier C., Bellity L., Saghbiny E., et al. Correlation between histopathological nerve assessment and clinical recovery in brachial plexus birth injuries // *J Hand Surg Eur Vol*. 2023. Vol. 49, N. 3. P. 583–590. doi: 10.1177/17531934231200378
- Socolovsky M., Costales J.R., Paez M.D., et al. Obstetric brachial plexus palsy: reviewing the literature comparing the results of primary versus secondary surgery // *Child's Nervous System*. 2016. Vol. 32, N. 3. P. 415–425. doi: 10.1007/s00381-015-2971-4
- Pondaag W., Malessy M.J.A. Evidence that nerve surgery improves functional outcome for obstetric brachial plexus injury // *J Hand Surg Eur*. 2021. Vol. 46, N. 3. P. 229–236. doi: 10.1177/1753193420934676
- Агранович О.Е., Икоева Г.А., Габбасова Е.Л., и др. Дифференциальная диагностика вялых парезов и параличей верхних конечностей у детей первых месяцев жизни (обзор литературы) // *Ортопедия, травматология и восстановительная хирургия детского возраста*. 2021. Т. 9, № 1. С. 115–126. EDN: JNYVFW doi: 10.17816/PTORS18645
- Orozco V., Balasubramanian S., Singh A. A systematic review of the electrodiagnostic assessment of neonatal brachial plexus // *Neurol Neurobiol (Tallinn)*. 2020. Vol. 3, N. 2. doi: 10.31487/j.nnb.2020.02.12
- Woźniak J., Kędzia A., Dudek K. Variability of the trunks and divisions of the brachial plexus in human fetuses // *Adv Clin Exp Med*. 2013. Vol. 22, N. 3. P. 309–318.
- Matejčík V., Haviarová Z., Šteňo A., et al. Intraspinial intradural variations of nerve roots // *Surg Radiol Anat*. 2017. Vol. 39, N. 12. P. 1385–1395. doi: 10.1007/s00276-017-1903-2
- Gilcrease-Garcia B.M., Deshmukh S.D., Parsons M.S. Anatomy, imaging, and pathologic conditions of the brachial plexus // *Radiographics*. 2020. Vol. 40, N. 6. P. 1686–1714. doi: 10.1148/rq.2020200012
- Lao Q., Jia Y., Zhao K., et al. Value of high-resolution MRI in the diagnosis of brachial plexus injury in infants and young children // *Int J Gen Med*. 2022. Vol. 15. P. 5673–5680. doi: 10.2147/IJGM.S362738
- Mallouhi A., Marik W., Prayer D., et al. 3T MR tomography of the brachial plexus: structural and microstructural evaluation // *Eur J Radiol*. 2012. Vol. 81, N. 9. P. 2231–2245. doi: 10.1016/j.ejrad.2011.05.021
- Martín Nogueuel T., Barousse R. Actualización en la valoración de los nervios periféricos mediante resonancia magnética: de la neurografía morfológica a la funcional [Update in the evaluation of peripheral nerves by MRI, from morphological to functional neurography] // *Radiologia (Engl Ed)*. 2020. Vol. 62, N. 2. P. 90–101. doi: 10.1016/j.rx.2019.06.005
- Gasparotti R., Lodoli G., Meoded A., et al. Feasibility of diffusion tensor tractography of brachial plexus injuries at 1.5 T // *Invest Radiol*. 2013. Vol. 48, N. 2. P. 104–112. doi: 10.1097/rli.0b013e3182775267
- Preston D.C., Shapiro B.E. Electromyography and neuromuscular disorders: clinical-electrophysiologic-ultrasound correlations. Elsevier Health Sciences, 2020.
- Eppenberger P., Andreisek G., Chhabra A. Magnetic resonance neurography: diffusion tensor imaging and future directions // *Neuroimaging Clin N Am*. 2014. Vol. 24. P. 245–256. doi: 10.1016/j.nic.2013.03.031
- Takahara T., Hendrikse J., Yamashita T., et al. Diffusion-weighted MR neurography of the brachial plexus: feasibility study // *Radiology*. 2008. Vol. 249, N. 2. P. 653–660. doi: 10.1148/radiol.2492071826
- Tagliafico A., Calabrese M., Puntoni M., et al. Brachial plexus MR imaging: accuracy and reproducibility of DTI-derived measurements and fibre tractography at 3.0-T // *Eur Radiol*. 2011. Vol. 21, N. 8. P. 1764–1771. doi: 10.1007/s00330-011-2100-z
- Ho M.J., Manoliu A., Kuhn F.P., et al. Evaluation of reproducibility of diffusion tensor imaging in the brachial plexus at 3.0 T // *Investigat Radiol*. 2017. Vol. 52, N. 8. P. 482–487. doi: 10.1097/RLI.0000000000000363
- Oudeman J., Verhamme C., Engbersen M.P., et al. Diffusion tensor MRI of the healthy brachial plexus // *PLoS One*. 2018. Vol. 13, N. 5. doi: 10.1371/journal.pone.0196975
- Su X., Kong X., Liu D., et al. Multimodal magnetic resonance imaging of peripheral nerves: Establishment and validation of brachial and lumbosacral plexi measurements in 163 healthy subjects // *Eur J Radiol*. 2019. Vol. 117. P. 41–48. doi: 10.1016/j.ejrad.2019.05.017
- Wade R.G., Whittam A., Teh I., et al. Diffusion tensor imaging of the roots of the brachial plexus: a systematic review and meta-

analysis of normative values // *Clin Transl Imaging*. 2020. Vol. 8, N. 6. P. 419–431. doi: 10.1007/s40336-020-00393-x

25. Van der Jagt P.K., Dik P., Froeling M., et al. Architectural configuration and microstructural properties of the sacral plexus: a diffusion tensor MRI and fiber tractography study // *Neuroimage*. 2012. Vol. 62, Vol. 3. P. 1792–1799. doi: 10.1016/j.neuroimage.2012.06.001

26. Kronlage M., Schwehr V., Schwarz D. Peripheral nerve diffusion tensor imaging (DTI): normal values and demographic determinants in a cohort of 60 healthy individuals // *Eur Radiol*. 2018. Vol. 28, N. 5. P. 1801–1808. doi: 10.1007/s00330-017-5134-z

27. Tanitame K., Iwakado Y., Akiyama Y. Effect of age on the fractional anisotropy (FA) value of peripheral nerves and clinical significance of the age-corrected FA value for evaluating polyneuropathies // *Neuroradiology*. 2012. Vol. 54, N. 8. P. 815–821. doi: 10.1007/s00234-011-0981-9

28. Wade R.G., Tanner S.F., Teh I., et al. Diffusion tensor imaging for diagnosing root avulsions in traumatic adult brachial plexus injuries: a proof-of-concept study // *Front Surg*. 2020. Vol. 7. P. 19. doi: 10.3389/fsurg.2020.00019

29. Farrell J.A., Landman B.A., Jones C.K., et al. Effects of signal-to-noise ratio on the accuracy and reproducibility of diffusion tensor imaging-derived fractional anisotropy, mean diffusivity, and principal eigenvector measurements at 1.5 T // *JMRI*. 2007. Vol. 26, N. 3. P. 756–767. doi: 10.1002/jmri.21053

30. Helmer K.G., Chou M.C., Preciado R.I., et al. Multi-site study of diffusion metric variability: effects of site, vendor, field strength, and echo time on regions-of-interest and histogram-bin analyses // *Proc SPIE Int Soc Opt Eng*. 2016. Vol. 9788. doi: 10.1117/12.2217445

31. Vos S.B., Jones D.K., Viergever M.A., et al. Partial volume effect as a hidden covariate in DTI analyses // *Neuroimage*. 2011. Vol. 55, N. 4. P. 1566–1576. doi: 10.1016/j.neuroimage.2011.01.048

32. Johansen-Berg H., Behrens T.E., editors. Diffusion MRI: from quantitative measurement to in vivo neuroanatomy. Academic Press, 2013. doi: 10.1016/B978-0-12-374709-9.X0001-6

33. Cao J., He B., Wang S., et al. Diffusion tensor imaging of tibial and common peroneal nerves in patients with Guillain–Barre syndrome: a feasibility study // *J Magn Reson Imaging*. 2019. Vol. 49, N. 5. P. 1356–1364. doi: 10.1002/jmri.26324

34. Cheng H., Lan H., Bao Y., et al. Application of magnetic resonance diffusion tensor imaging in diagnosis of lumbosacral nerve root compression // *Curr Med Imaging*. 2024. Vol. 20. doi: 10.2174/1573405620666230612122725

35. Kakuda T., Fukuda H., Tanitame K., et al. Diffusion tensor imaging of peripheral nerve in patients with chronic inflammatory de-

myelinating polyradiculoneuropathy: a feasibility study // *Neuroradiology*. 2011. Vol. 53, N. 12. P. 955–960. doi: 10.1007/s00234-010-0833-z

36. Pridmore M.D., Glassman G.E., Pollins A.C., et al. Initial findings in traumatic peripheral nerve injury and repair with diffusion tensor imaging // *Ann Clin Transl Neurol*. 2021. Vol. 8, N. 2. P. 332–347. doi: 10.1002/acn3.51270

37. Simon N.G., Kliot M. Diffusion weighted MRI and tractography for evaluating peripheral nerve degeneration and regeneration // *Neural Regen Res*. 2014. Vol. 9, N. 24. P. 2122–2124. doi: 10.4103/1673-5374.147941

38. Chen L., Gao S.C., Gu Y.D., et al. Histopathologic study of the neuroma-in-continuity in obstetric brachial plexus palsy // *Plast Reconstr Surg*. 2008. Vol. 121, N. 6. P. 2046–2054. doi: 10.1097/PRS.0b013e3181706e7e

39. Manzanera Esteve I.V., Farinas A.F., Pollins A.C., et al. Probabilistic assessment of nerve regeneration with diffusion MRI in rat models of peripheral nerve trauma // *Sci Rep*. 2019. Vol. 9, N. 1. P. 19686. doi: 10.1038/s41598-019-56215-2

40. Heckel A., Weiler M., Xia A, et al. Peripheral nerve diffusion tensor imaging: assessment of axon and myelin sheath integrity // *PLoS One*. 2015. Vol. 10, N. 6. P. e0130833. doi: 10.1371/journal.pone.0130833

41. Scarfone H., McComas A.J., Pape K., et al. Denervation and reinnervation in congenital brachial palsy // *Muscle Nerve*. 1999. Vol. 22, N. 5. P. 600–607. doi: 10.1002/(sici)1097-4598(199905)22:5<600::aid-mus8>3.0.co;2-b

42. Payen M., Didier M., Vialle R., et al. MRI of brachial plexus using diffusion tensor imaging: a pilot study for the use of resolve sequence surgical and radiologic anatomy // *Surg Radiol Anat*. 2023. Vol. 45, N. 12. P. 1567–1577. doi: 10.1007/s00276-023-03255-z

43. Живолупов С.А., Гневывшев Е.Н., Рашидов Н.А., и др. Нейропластические закономерности восстановления функций при травматических невропатиях и плексопатиях // *Вестник Российской военно-медицинской академии*. 2015. № 1(49). С. 81–90. EDN: TMXBMH

44. Adidharma W., Khouri A.N., Lee J.C., et al. Sensory nerve regeneration and reinnervation in muscle following peripheral nerve injury // *Muscle Nerve*. 2022. Vol. 66, N. 4. P. 384–396. doi: 10.1002/mus.27661

45. Brunetti O., Carretta M., Magni F., et al. Role of the interval between axotomy and nerve suture on the success of muscle reinnervation: an experimental study in the rabbit // *Exp Neurol*. 1985. Vol. 90, N. 2. P. 308–321. doi: 10.1016/0014-4886(85)90021-4

46. Ferrante M.A. Brachial plexopathies: classification, causes, and consequences // *Muscle Nerve*. 2004. Vol. 30, N. 5. P. 547–568. doi: 10.1002/mus.20131

## REFERENCES

- Lalka A, Gralla J, Sibbel SE. Brachial plexus birth injury: epidemiology and birth weight impact on risk factors. *J Pediatr Orthop*. 2020;40(6):e460–e465. doi: 10.1097/BPO.0000000000001447
- Leblebicioğlu G, Pondaag W. Brachial plexus birth injury: advances and controversies. *J Hand Surg Eur Vol*. 2024;49(6):747–757. doi: 10.1177/17531934241231173
- Ojumah N, Ramdhan RC, Wilson C, et al. Neurological neonatal birth injuries: a literature review. *Cureus*. 2017;9(12). doi: 10.7759/cureus.1938
- Thatte MR, Hiremath A, Nayak N, et al. Obstetric brachial plexus palsy. Diagnosis and management strategy. *J Peripheral Nerve Surg*. 2017;1(1):2–9.
- Moulinier C, Bellity L, Saghbiny E, et al. Correlation between histopathological nerve assessment and clinical recovery in brachial plexus birth injuries. *J Hand Surg Eur Vol*. 2024;49(5):583–590. doi: 10.1177/17531934231200378
- Socolovsky M, Costales JR, Paez MD, et al. Obstetric brachial plexus palsy: reviewing the literature comparing the results of primary versus secondary surgery. *Childs Nerv Syst*. 2016;32(3):415–425. doi: 10.1007/s00381-015-2971-4
- Pondaag W, Malessy MJA. Evidence that nerve surgery improves functional outcome for obstetric brachial plexus injury. *J Hand Surg Eur Vol*. 2021;46(3):229–236. doi: 10.1177/1753193420934676

8. Agranovich OE, Ikoeva GA, Gabbasova EL, et al. Differential diagnosis of flaccid palsy of the upper extremities in children first months after birth (literature review). *Pediatric Traumatology, Orthopaedics and Reconstructive Surgery*. 2021;9(1):115–126. EDN: JNYVFW doi: 10.17816/PTORS18645
9. Orozco V, Balasubramanian S, Singh A. A systematic review of the electrodiagnostic assessment of neonatal brachial plexus. *Neurobiol (Tallinn)*. 2020;3(2). doi: 10.31487/j.nnb.2020.02.12
10. Woźniak J, Kędzia A, Dudek K. Variability of the trunks and divisions of the brachial plexus in human fetuses. *Adv Clin Exp Med*. 2013;22(3):309–318.
11. Matejčík V, Haviarová Z, Šteňo A, et al. Intraspinial intradural variations of nerve roots. *Surg Radiol Anat*. 2017;39(12):1385–1395. doi: 10.1007/s00276-017-1903-2
12. Gilcrease-Garcia BM, Deshmukh SD, Parsons MS. Anatomy, Imaging, and Pathologic Conditions of the Brachial Plexus. *Radiographics*. 2020;40(6):1686–1714. doi: 10.1148/rq.2020200012
13. Lao Q, Jia Y, Zhao K, et al. Value of high-resolution MRI in the diagnosis of brachial plexus injury in infants and young children. *Int J Gen Med*. 2022;15:5673–5680. doi: 10.2147/IJGM.S362738
14. Mallouhi A, Marik W, Prayer D, et al. 3T MR tomography of the brachial plexus: structural and microstructural evaluation. *Eur J Radiol*. 2012;81(9):2231–2245. doi: 10.1016/j.ejrad.2011.05.021
15. Martín Noguero T, Barousse R. Update in the evaluation of peripheral nerves by MRI, from morphological to functional neurography. Actualización en la valoración de los nervios periféricos mediante resonancia magnética: de la neurografía morfológica a la funcional. *Radiologia (Engl Ed)*. 2020;62(2):90–101. doi: 10.1016/j.rx.2019.06.005
16. Gasparotti R, Lodoli G, Meoded A, et al. Feasibility of diffusion tensor tractography of brachial plexus injuries at 1.5 T. *Invest Radiol*. 2013;48(2):104–112. doi: 10.1097/rli.0b013e3182775267
17. Preston DC, Shapiro BE. *Electromyography and neuromuscular disorders: clinical-electrophysiologic-ultrasound correlations*. Elsevier Health Sciences; 2020.
18. Eppenberger P, Andreisek G, Chhabra A. Magnetic resonance neurography: diffusion tensor imaging and future directions. *Neuroimaging Clin N Am*. 2014;24(1):245–256. doi: 10.1016/j.nic.2013.03.031
19. Takahara T, Hendrikse J, Yamashita T, et al. Diffusion-weighted MR neurography of the brachial plexus: feasibility study. *Radiology*. 2008;249(2):653–660. doi: 10.1148/radiol.2492071826
20. Tagliafico A, Calabrese M, Puntoni M, et al. Brachial plexus MR imaging: accuracy and reproducibility of DTI-derived measurements and fibre tractography at 3.0-T. *Eur Radiol*. 2011;21(8):1764–1771. doi: 10.1007/s00330-011-2100-z
21. Ho MJ, Manoliu A, Kuhn FP, et al. Evaluation of reproducibility of diffusion tensor imaging in the brachial plexus at 3.0 T. *Invest Radiol*. 2017;52(8):482–487. doi: 10.1097/RLI.0000000000000363
22. Oudemans J, Verhamme C, Engbersen MP, et al. Diffusion tensor MRI of the healthy brachial plexus. *PLoS One*. 2018;13(5). doi: 10.1371/journal.pone.0196975
23. Su X, Kong X, Liu D, et al. Multimodal magnetic resonance imaging of peripheral nerves: Establishment and validation of brachial and lumbosacral plexi measurements in 163 healthy subjects. *Eur J Radiol*. 2019;117:41–48. doi: 10.1016/j.ejrad.2019.05.017
24. Wade RG, Whittam A, Teh I, Andersson G, et al. Diffusion tensor imaging of the roots of the brachial plexus: a systematic review and meta-analysis of normative values. *Clin Transl Imaging*. 2020;8(6):419–431. doi: 10.1007/s40336-020-00393-x
25. van der Jagt PK, Dik P, Froeling M, et al. Architectural configuration and microstructural properties of the sacral plexus: a diffusion tensor MRI and fiber tractography study. *Neuroimage*. 2012;62(3):1792–1799. doi: 10.1016/j.neuroimage.2012.06.001
26. Kronlage M, Schwehr V, Schwarz D, et al. Peripheral nerve diffusion tensor imaging (DTI): normal values and demographic determinants in a cohort of 60 healthy individuals. *Eur Radiol*. 2018;28(5):1801–1808. doi: 10.1007/s00330-017-5134-z
27. Tanitame K, Iwakado Y, Akiyama Y, et al. Effect of age on the fractional anisotropy (FA) value of peripheral nerves and clinical significance of the age-corrected FA value for evaluating polyneuropathies. *Neuroradiology*. 2012;54(8):815–821. doi: 10.1007/s00234-011-0981-9
28. Wade RG, Tanner SF, Teh I, et al. Diffusion tensor imaging for diagnosing root avulsions in traumatic adult brachial plexus injuries: a proof-of-concept study. *Front Surg*. 2020;7:19. doi: 10.3389/fsurg.2020.00019
29. Farrell JA, Landman BA, Jones CK, et al. Effects of signal-to-noise ratio on the accuracy and reproducibility of diffusion tensor imaging-derived fractional anisotropy, mean diffusivity, and principal eigenvector measurements at 1.5 T. *J Magn Reson Imaging*. 2007;26(3):756–767. doi: 10.1002/jmri.21053
30. Helmer KG, Chou MC, Preciado RI, et al. Multi-site study of diffusion metric variability: effects of site, vendor, field strength, and echo time on regions-of-interest and histogram-bin analyses. *Proc SPIE Int Soc Opt Eng*. 2016;9788. doi: 10.1117/12.2217445
31. Vos SB, Jones DK, Viergever MA, Leemans A. Partial volume effect as a hidden covariate in DTI analyses. *Neuroimage*. 2011;55(4):1566–1576. doi: 10.1016/j.neuroimage.2011.01.048
32. Johansen-Berg H, Behrens TE, editors. *Diffusion MRI: from quantitative measurement to in vivo neuroanatomy*. Academic Press; 2013. doi: 10.1016/B978-0-12-374709-9.X0001-6
33. Cao J, He B, Wang S, et al. Diffusion tensor imaging of tibial and common peroneal nerves in patients with Guillain-Barre syndrome: a feasibility study. *J Magn Reson Imaging*. 2019;49(5):1356–1364. doi: 10.1002/jmri.26324
34. Cheng H, Lan H, Bao Y, et al. Application of magnetic resonance diffusion tensor imaging in diagnosis of lumbosacral nerve root compression. *Curr Med Imaging*. 2024;20. doi: 10.2174/1573405620666230612122725
35. Kakuda T, Fukuda H, Tanitame K, et al. Diffusion tensor imaging of peripheral nerve in patients with chronic inflammatory demyelinating polyradiculoneuropathy: a feasibility study. *Neuroradiology*. 2011;53(12):955–960. doi: 10.1007/s00234-010-0833-z
36. Pridmore MD, Glassman GE, Pollins AC, et al. Initial findings in traumatic peripheral nerve injury and repair with diffusion tensor imaging. *Ann Clin Transl Neurol*. 2021;8(2):332–347. doi: 10.1002/acn3.51270
37. Simon NG, Kliot M. Diffusion weighted MRI and tractography for evaluating peripheral nerve degeneration and regeneration. *Neural Regen Res*. 2014;9(24):2122–2124. doi: 10.4103/1673-5374.147941
38. Chen L, Gao SC, Gu YD, et al. Histopathologic study of the neurotoma-in-continuity in obstetric brachial plexus palsy. *Plast Reconstr Surg*. 2008;121(6):2046–2054. doi: 10.1097/PRS.0b013e3181706e7e
39. Manzanera Esteve IV, Farinas AF, Pollins AC, et al. Probabilistic assessment of nerve regeneration with diffusion MRI in rat models of peripheral nerve trauma. *Sci Rep*. 2019;9(1). doi: 10.1038/s41598-019-56215-2
40. Heckel A, Weiler M, Xia A, et al. Peripheral nerve diffusion tensor imaging: assessment of axon and myelin sheath integrity. *PLoS One*. 2015;10(6). doi: 10.1371/journal.pone.0130833

**41.** Scarfone H, McComas AJ, Pape K, et al. Denervation and reinnervation in congenital brachial palsy. *Muscle Nerve*. 1999;22(5):600–607. doi: 10.1002/(sici)1097-4598(199905)22:5<600::aid-mus8>3.0.co;2-b

**42.** Payen M, Didier M, Vialle R, et al. MRI of brachial plexus using diffusion tensor imaging: a pilot study for the use of resolve sequence surgical and radiologic anatomy. *Surg Radiol Anat*. 2023;45(12):1567–1577. doi: 10.1007/s00276-023-03255-z

**43.** Zhivolupov SA, Gnevyshev EN, Rashidov NA, et al. Neuroplastic patterns of functions restoration in case of traumatic neuropathies and plexopathies. *Bulletin of the Russian Military Medical Academy*. 2015;(1):81–90. EDN: TMXBMH

**44.** Adidharma W, Khouri AN, Lee JC, et al. Sensory nerve regeneration and reinnervation in muscle following peripheral nerve injury. *Muscle Nerve*. 2022;66(4):384–396. doi: 10.1002/mus.27661

**45.** Brunetti O, Carretta M, Magni F, et al. Role of the interval between axotomy and nerve suture on the success of muscle reinnervation: an experimental study in the rabbit. *Exp Neurol*. 1985;90(2):308–321. doi: 10.1016/0014-4886(85)90021-4

**46.** Ferrante MA. Brachial plexopathies: classification, causes, and consequences. *Muscle Nerve*. 2004;30(5):547–568. doi: 10.1002/mus.20131

## ОБ АВТОРАХ

### \* Алина Михайловна Ходоровская;

адрес: Россия, 196603, Санкт-Петербург, Пушкин, ул. Парковая, д. 64–68;  
ORCID: 0000-0002-2772-6747; eLibrary SPIN: 3348-8038;  
e-mail: alinamyh@gmail.com

**Александр Юрьевич Ефимцев**, д-р мед. наук;  
ORCID: 0000-0003-2249-1405; eLibrary SPIN: 3459-2168;  
e-mail: atralf@mail.ru

**Ольга Евгеньевна Агранович**, д-р мед. наук;  
ORCID: 0000-0002-6655-4108; eLibrary SPIN: 4393-3694;  
e-mail: olga\_agranovich@yahoo.com

**Мargarita Владимировна Савина**, канд. мед. наук;  
ORCID: 0000-0001-8225-3885; eLibrary SPIN: 5710-4790;  
e-mail: drevma@yandex.ru

**Вячеслав Иванович Зорин**, канд. мед. наук, доцент;  
ORCID: 0000-0002-9712-5509; eLibrary SPIN: 4651-8232;  
e-mail: zoringlu@yandex.ru

**Сергей Александрович Брайлов**;  
ORCID: 0000-0003-2372-9817; eLibrary SPIN: 9369-6073;  
e-mail: sergeybraylov@mail.ru

**Анастасия Ивановна Аракелян**, канд. мед. наук;  
ORCID: 0000-0002-3998-4954; eLibrary SPIN: 9224-5488;  
e-mail: a\_bryanskaya@mail.ru

**Сергей Андреевич Лукьянов**, канд. мед. наук;  
ORCID: 0000-0002-8278-7032; eLibrary SPIN: 3684-5167;  
e-mail: Sergey.lukyanov95@yandex.ru

**Александр Сергеевич Грищенко**;  
ORCID: 0000-0003-0910-6904; eLibrary SPIN: 5654-0112;  
e-mail: gasradiology@gmail.ru

**Яна Альбертовна Филн**, клинический ординатор;  
ORCID: 0009-0009-0778-6396;  
e-mail: filin\_yana@mail.ru

**Даниил Борисович Вчерашний**, канд. физ.-мат. наук;  
ORCID: 0000-0003-1658-789X; eLibrary SPIN: 6139-7842;  
e-mail: dan-v@yandex.ru

**Виктория Владимировна Морозова**;  
ORCID: 0009-0007-5961-2641; e-mail: frostigersieg@gmail.com

## AUTHOR INFORMATION

### \* Alina M. Khodorovskaya, MD;

address: 64–68 Parkovaya str.,  
Pushkin, Saint Petersburg, 196603, Russia;  
ORCID: 0000-0002-2772-6747; eLibrary SPIN: 3348-8038;  
e-mail: alinamyh@gmail.com

**Aleksandr Yu. Efimtsev**, MD, PhD, Dr. Sci. (Med.);  
ORCID: 0000-0003-2249-1405; eLibrary SPIN: 3459-2168;  
e-mail: atralf@mail.ru

**Olga E. Agranovich**, MD, PhD, Dr. Sci. (Med.);  
ORCID: 0000-0002-6655-4108; eLibrary SPIN: 4393-3694;  
e-mail: olga\_agranovich@yahoo.com

**Margarita V. Savina**, MD, PhD, Cand. Sci. (Med.);  
ORCID: 0000-0001-8225-3885; eLibrary SPIN: 5710-4790;  
e-mail: drevma@yandex.ru

**Vyacheslav I. Zorin**, MD, PhD, Cand. Sci. (Med.), Assistant Professor;  
ORCID: 0000-0002-9712-5509; eLibrary SPIN: 4651-8232;  
e-mail: zoringlu@yandex.ru

**Sergey A. Braylov**, MD;  
ORCID: 0000-0003-2372-9817; eLibrary SPIN: 9369-6073;  
e-mail: sergeybraylov@mail.ru

**Anastasiia I. Arakelian**, MD, PhD, Cand. Sci. (Med.);  
ORCID: 0000-0002-3998-4954; eLibrary SPIN: 9224-5488;  
e-mail: a\_bryanskaya@mail.ru

**Sergey A. Lukyanov**, MD, PhD, Cand. Sci. (Med.);  
ORCID: 0000-0002-8278-7032; eLibrary SPIN: 3684-5167;  
e-mail: Sergey.lukyanov95@yandex.ru

**Aleksandr S. Grishchenkov**, MD;  
ORCID: 0000-0003-0910-6904; eLibrary SPIN: 5654-0112;  
e-mail: gasradiology@gmail.ru

**Yana A. Filin**, MD, resident;  
ORCID: 0009-0009-0778-6396;  
e-mail: filin\_yana@mail.ru

**Daniil B. Vcherashniy**, PhD, Cand. Sci. (Phys.-Math.);  
ORCID: 0000-0003-1658-789X; eLibrary SPIN: 6139-7842;  
e-mail: dan-v@yandex.ru

**Viktoria V. Morozova**, MD;  
ORCID: 0009-0007-5961-2641; e-mail: frostigersieg@gmail.com

\* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author