

УДК 616.832-009.7:616-073.756

<http://dx.doi.org/10.22328/2079-5343-2025-16-1-66-73>

ДИФфуЗИОННО-ТЕНЗОРНАЯ ВИЗУАЛИЗАЦИЯ В ИССЛЕДОВАНИИ ДЕГЕНЕРАЦИИ СПИННОМОЗГОВЫХ ПУТЕЙ ПОСЛЕ ТРАВМЫ СПИННОГО МОЗГА: ПРОСПЕКТИВНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ

О. В. Божко[✉], М. В. Ублинский^{✉*}, Т. А. Ахадов[✉], Е. В. Воронкова[✉], И. Н. Новосёлова[✉], И. В. Понина[✉],
А. А. Кобзева[✉], И. А. Мельников[✉]

Научно-исследовательский институт неотложной детской хирургии и травматологии — Клиника доктора Рошала
Департамента здравоохранения города Москвы, Москва, Россия

ВВЕДЕНИЕ: Травмы спинного мозга у детей составляют до 10% всех повреждений у детей, однако остаются значимой проблемой, так как часто приводят к серьезным последствиям, вплоть до инвалидности. Традиционная МРТ не позволяет обнаружить различия в неповрежденных отделах спинного мозга ни в острый, ни в хронический период. Введение метода диффузионно-тензорной визуализации (ДТВ) в протокол исследования поврежденного спинного мозга позволяет выявить даже минимальные, но значимые микроструктурные нарушения.

ЦЕЛЬ: Оценить с помощью метода ДТВ микроструктурные изменения в восходящих и нисходящих волокнах шейного отдела спинного мозга выше уровня повреждения у пациентов с травмой спинного мозга в различные сроки после травмы.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ: В исследовании было включено 39 детей в возрасте от 12 до 18 лет (средний возраст $14,3 \pm 1,8$ года) с травмой спинного мозга ниже уровня позвонка ThIII, из них: 21 человек с полным повреждением спинного мозга — степень А по классификации ASIA (группа А), 18 детей с неполным повреждением спинного мозга — степень В-D по классификации ASIA (группа В). Исследование проводилось на аппарате МРТ с напряженностью магнитного поля 3,0 Т Philips Achieva dStream. В расчет принимались следующие параметры ДТВ: FA, AD, MD, RD.

РЕЗУЛЬТАТЫ: В области латерального кортикоспинального тракта выявлено понижение значений FA и увеличение значений RD для пациентов группы А по сравнению с группой контроля в период восстановления. В области дорсальных канальчиков понижение значений FA для пациентов группы А наблюдается уже в подострый период после травмы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ: ДТВ является удобным инструментом для анализа посттравматического спинного мозга, поскольку позволяет не только обнаружить изменения, не видимые при других методах исследования, но и получить количественные характеристики, что позволяет на их основе сформировать объективные критерии оценки состояния спинного мозга, которые в дальнейшем могут быть использованы для контроля лечения и реабилитации детей со спинномозговой травмой.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: дети, спинной мозг, позвоночно-спинномозговая травма, магнитно-резонансная томография, диффузно-тензорная визуализация

* Для корреспонденции: Ублинский Максим Вадимович, e-mail: maxublinsk@mail.ru

Для цитирования: Божко О.В., Ублинский М.В., Ахадов Т.А., Воронкова Е.В., Новосёлова И.Н., Понина И.В., Кобзева А.А., Мельников И.А. Диффузионно-тензорная визуализация в исследовании дегенерации спинномозговых путей после травмы спинного мозга: проспективное исследование // *Лучевая диагностика и терапия*. 2025. Т. 16, № 1. С. 66–73, doi: <http://dx.doi.org/10.22328/2079-5343-2025-16-1-66-73>.

DIFFUSION TENSOR IMAGING IN THE STUDY OF SPINAL TRACT DEGENERATION AFTER SPINAL CORD INJURY: A PROSPECTIVE STUDY

Olga V. Bozhko[✉], Maxim V. Ublinskiy^{✉*}, Tolibdzhon A. Akhadov[✉], Elena V. Voronkova[✉], Irina N. Novoselova[✉],
Irina V. Ponina[✉], Anna A. Kobzeva[✉], Ilya A. Melnikov[✉]

Clinical and Research Institute of Emergency Pediatric Surgery and Trauma-Dr Roshal's Clinic, Moscow, Russia

INTRODUCTION: Spinal cord injuries in children account for up to 10% of all injuries in children, but remain a significant problem, as they often lead to serious consequences, including disability. Traditional MRI does not allow detecting differences in undamaged parts of the spinal cord in either the acute or chronic period. Introduction of diffusion tensor imaging (DTI) into the protocol for examining damaged spinal cord allows detecting even minimal but significant microstructural abnormalities.

© Авторы, 2025. Издательство ООО «Балтийский медицинский образовательный центр». Данная статья распространяется на условиях «открытого доступа», в соответствии с лицензией CCBY-NC-SA 4.0 («Attribution-NonCommercial-ShareAlike» / «Атрибуция-Некоммерчески-Сохранение Условий» 4.0), которая разрешает неограниченное некоммерческое использование, распространение и воспроизведение на любом носителе при условии указания автора и источника. Чтобы ознакомиться с полными условиями данной лицензии на русском языке, посетите сайт: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.ru>

OBJECTIVE: To evaluate, using DTI, microstructural changes in the ascending and descending fibers of the cervical spinal cord above the level of injury in patients with spinal cord trauma at different periods after injury.

MATERIALS AND METHODS: The study included 39 children aged 12 to 18 years (mean age 14.3 ± 1.8 years) with spinal cord injury below the level of the Th3 vertebra, including: 21 patients with complete spinal cord injury — grade A according to the ASIA classification (group A), 18 patients with incomplete spinal cord injury — grade B-D according to the ASIA classification (group B). The study was performed on an MRI scanner 3.0 T Philips Achieva dStream. The following DTI parameters were taken into account: FA, AD, MD, RD.

RESULTS: In the area of lateral corticospinal tract, a decrease in FA value and an increase in RD value for patients of group A compared to the control group during the recovery period were revealed. In the area of the dorsal funiculi, a decrease in FA values for patients of group A is observed already in the subacute period after injury.

CONCLUSION: DTI is a convenient tool for analyzing the post-traumatic spinal cord, since it allows not only to detect changes that are not visible with other research methods, but also to obtain quantitative characteristics, which allows on their basis to form objective criteria for assessing state of spinal cord, which can then be used to monitor the treatment and rehabilitation of children with spinal cord injury.

KEYWORDS: children, spinal cord, spinal cord injury, magnetic resonance imaging, diffusion tensor imaging

* **For correspondence:** Maxim V. Ublinskiy, e-mail: maxublinsk@mail.ru

For citation: Bozhko O.V., Ublinskiy M.V., Akhadov T.A., Voronkova E.V., Novoselova I.N., Ponina I.V., Kobzeva A.A., Melnikov I.A. Diffusion tensor imaging in the study of spinal tract degeneration after spinal cord injury: a prospective study // *Diagnostic radiology and radiotherapy*. 2025. Vol. 16, No. 1. P. 66–73, <http://dx.doi.org/10.22328/2079-5343-2025-16-1-66-73>.

Введение. Травмы спинного мозга у детей составляют до 10% всех повреждений у детей, однако остаются значимой проблемой, так как часто приводят к серьезным последствиям, вплоть до инвалидности [1, 2]. Реабилитация после травмы спинного мозга (ТСМ) и связанных с ней нейродегенеративных изменений — это трудоемкий и продолжительный процесс [3]. Стоит отметить, что повреждение спинного мозга не ограничивается только зоной травмы [4]. Процессы аксональной дегенерации и демиелинизации поврежденных волокон (как в дистальных, так и проксимальных отделах поврежденного аксона) начинаются сразу после травмы, что со временем приводит к изменению неврологического статуса пациентов [5].

Наиболее информативным диагностическим методом исследования спинного мозга является магнитно-резонансная томография (МРТ), позволяющая установить или предположить наличие макроскопических патологических изменений. Однако рутинная МРТ не позволяет обнаружить различия в поврежденных отделах спинного мозга ни в острый, ни в хронический период [6]. Введение метода диффузионно-тензорной визуализации (ДТВ) в протокол исследования поврежденного спинного мозга позволяет выявить даже минимальные, но значимые микроструктурные нарушения [7]. Преимуществом ДТВ является количественная информация о значении и направленности диффузии молекул воды в каждом вокселе на МР-изображении. Обычно используют следующие количественные характеристики ДТВ — фракционная анизотропия (FA), которая описывает степень направленности диффузии; средняя диффузия (MD), которая выражает величину диффузии; аксиальная диффузия (AD), которая представляет

собой диффузию воды параллельно аксональным волокнам; и радиальная диффузия (RD), которая представляет собой диффузию воды перпендикулярно аксональным волокнам [8]. Данные параметры ДТВ позволяют оценить целостность нейрональных трактов и сохранность миелиновых оболочек в спинном мозге [9] и обеспечивают более подробную и точную оценку микроструктуры ткани спинного мозга при соотнесении с клинически значимыми результатами [10, 11]. Применение ДТВ при исследованиях спинного мозга позволяет выявить потенциальные биомаркеры для прогностической и терапевтической оценки статуса спинного мозга в посттравматическом состоянии [8, 12]. И поэтому крайне важно продолжать исследования всех аспектов повреждения спинного мозга, что может привести к пониманию основных механизмов, участвующих в повреждении спинного мозга, позволит разработать терапевтические стратегии, направленные на облегчение таких сенсомоторных дефицитов, и будет способствовать лучшей социальной реинтеграции пациентов с повреждением спинного мозга.

Целью данной работы была оценка с помощью метода ДТВ микроструктурных изменений в восходящих и нисходящих волокнах шейного отдела спинного мозга выше уровня повреждения у пациентов с травмой спинного мозга в различные сроки после травмы.

Материалы и методы. Исследование было одобрено локальным Комитетом института по этике (протокол № 1 от 10.03.2022). Информированное согласие было получено от всех участников, включенных в исследование, или их законных представителей.

В исследование было включено 39 детей в возрасте от 12 до 18 лет (средний возраст $14,3 \pm 1,8$ года) с травмой спинного мозга ниже уровня позвонка

ТНЦ, из них: 21 человек (18 девочек, 3 мальчика) с полным повреждением спинного мозга — степень А по классификации ASIA [13] (группа А), 18 детей (7 девочек, 11 мальчиков) с неполным повреждением спинного мозга — степень В-D по классификации ASIA (группа В). Сроки проведения МРТ после травмы составляли от 1 дня до 5 лет. Пациенты были разделены на 3 подгруппы по давности травмы: первая подгруппа — 1–29 дней после травмы (острый период) — включала 4 детей в группе А, 5 детей в группе В; вторая подгруппа — 30–89 дней после травмы (подострый период) — включала 4 детей в группе А, 6 детей в группе В; в третью группу были включены дети со сроками после травмы более 90 дней (период восстановления) — 11 детей в группе А, 7 детей в группе В.

В группу контроля было включено 14 здоровых детей в возрасте от 12 до 18 лет, из них 6 девочек, 8 мальчиков, средний возраст $15,2 \pm 1,2$ года (группа контроля).

Исследование проводилось на аппарате МРТ с напряженностью магнитного поля 3,0 Т Philips Achieva dStream, использовались катушки 15-канальная приемная катушка «голова-шея» и 16-канальная поверхностная катушка. По разработанному протоколу МРТ позвоночника и спинного мозга в первую очередь получали анатомические диагностические изображения спинного мозга (сагиттальные трехмерные T2-взвешенные изображения — 3D-T2-ВИ). Для получения ДТВ изображений использовали эхо-планарную импульсную последовательность IRIS ZOOM (Philips) [14] со следующими параметрами: TR=3000 мс, TE=30 мс, фактор ускорения EPI=21, размер вокселя $=2,2 \times 2,2 \times 2,2$ мм, поле обзора $=250 \times 110 \times 30$ мм, количество срезов =14; b-факторы 0 и 1000, число их усреднений =2 и 5 соответственно; число направлений применения диффузионного градиента =6. Синхронизация с сердечным циклом и дыханием не проводилась.

Для последующей обработки были получены данные ДТВ шейного отдела позвоночника, а также отдельно данные ДТВ латеральных кортикоспинальных трактов и дорсальных канатиков, где располагаются пучки Голля и Бурдаха.

Обработка и анализ данных ДТВ осуществлялась в программном пакете Spinal Cord Toolbox (SCT), реализованном на Python [15]. Протокол обработки включал автоматическую сегментацию T2-ВИ и ДТВ для выделения изображения спинного мозга, регистрацию сегментированного спинного мозга к встроенному атласу Spinal Cord Toolbox; применение специальной центральной маски к первичным данным ДТВ для исключения изображения за пределами спинного мозга, устранение артефактов движения данных ДТВ с помощью автоматизированного алгоритма. Результатом обработки данных стали полученные значения параметров диффу-

зии спинного мозга (FA, MD, AD и RD) на уровне всего шейного отдела позвоночника. Ключевым преимуществом программного пакета Spinal Cord Toolbox является возможность автоматического расчета параметров диффузии в выбранном объеме спинного мозга, в то время как большинство схожих программ для обработки данных диффузии ограничиваются ручным выделением двухмерной области интереса в выбранной плоскости.

На рис. 1 отображены основные этапы обработки данных диффузии спинного мозга в программе Spinal Cord Toolbox.

Статистический анализ для сравнения параметров диффузии между группами контроля, А и В проводился с использованием программного обеспечения GraphPad Prism. Проверка данных на нормальность распределения осуществлялась с помощью критерия Шапиро–Уилка. В случае нормального распределения данных применялся однофакторный дисперсионный анализ ANOVA для определения наличия статистически значимых различий между группами и тест Тьюки для попарного межгруппового сравнения. В случае ненормального распределения данных — критерий Краскела–Уоллиса и тест Данна. Значимость критериев определялась на уровне $p < 0,05$. Представление количественных переменных выполнялось с помощью среднего значения и стандартного отклонения (SD) для данных, имеющих нормальное распределение, и с помощью медианы, первого и третьего квартилей (Q1, Q3) для данных, имеющих ненормальное распределение.

Результаты. По данным ДТВ шейного отдела спинного мозга были рассчитаны значения FA, AD, MD и RD в ЛКСТ (нисходящий кортикоспинальный тракт) и ДК (тонкий и клиновидный пучки — восходящий путь) для каждой из исследуемых групп. Для ЛКСТ были взяты усредненные значения показателей для правой и левой стороны. Полученные значения приведены в табл. 1 и 2.

Статистически значимые различия между группами контроля и пациентов были обнаружены для параметров FA и RD.

В ЛКСТ было выявлено понижение значений FA и увеличение значений RD для пациентов группы А по сравнению с группой контроля в период восстановления (рис. 2).

В ДК понижение значений FA для пациентов группы А наблюдается уже в подострый период после травмы (рис. 2, а). Также в этот период между группами контроля и А обнаружено возможное различие на уровне статистической тенденции ($p = 0,063$) для параметра RD (рис. 2, в).

В период восстановления в ДК понижение коэффициента FA и повышение RD по сравнению с группой контроля найдено как для пациентов группы А, так и для пациентов группы В (рис. 2, б, г).

Обсуждение. Процесс восстановления после спинномозговой травмы занимает несколько лет.

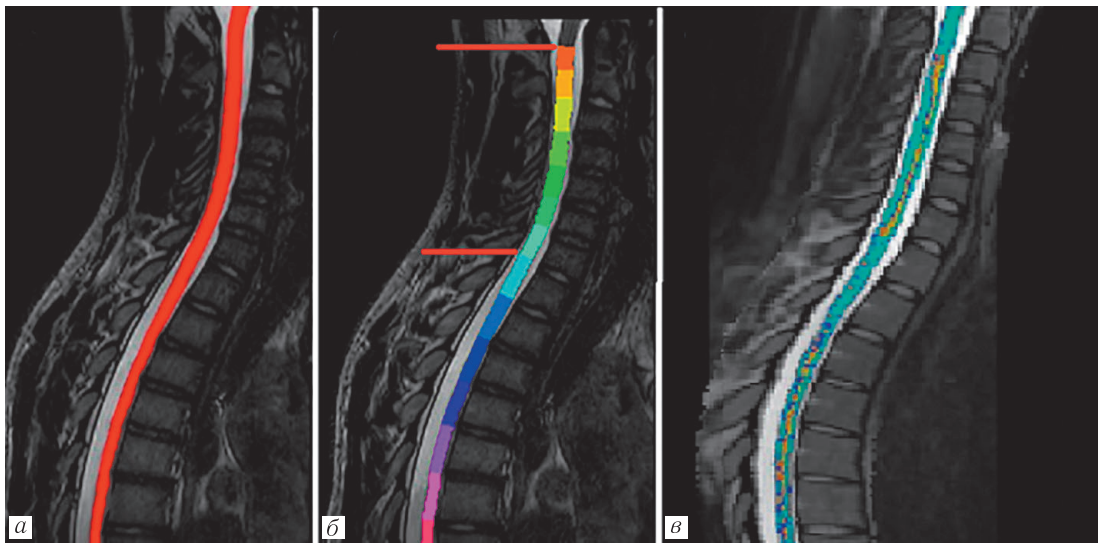


Рис. 1. Этапы обработки данных диффузии спинного мозга в программном пакете Spinal Cord Toolbox: *а* — автоматическая сегментация Т2-ВИ, выделение изображения спинного мозга; *б* — автоматическое определение уровней спинного мозга, соответствующее позвонкам. Красными линиями выделен объем интереса для данного исследования (volume of interest, VOI), соответствующий зоне спинного мозга на уровне шейного отдела позвоночника; *в* — регистрация данных ДТВ к сегментированному спинному мозгу и к встроенному анатомическому атласу Spinal Cord Toolbox

Fig. 1. Spinal cord diffusion data processing stages in the Spinal Cord Toolbox software package: *a* — automatic T2WI segmentation, spinal cord image selection; *б* — automatic determination of spinal cord levels corresponding to the vertebrae. The volume of interest (VOI) for this study corresponding to the spinal cord area at the level of cervical spine is highlighted with red lines; *в* — registration of DTI data to the segmented spinal cord and to the built-in anatomical atlas of the Spinal Cord Toolbox

Таблица 1

Значения параметров диффузии в различные сроки после травмы в группе контроля и группах пациентов с полным (группа А) и неполным (группа В) прерыванием спинного мозга в латеральном кортикоспинальном тракте. Значения представлены в виде: среднее±SD или медиана [Q1; Q3]

Table 1

Values of diffusion parameters at different times after injury in the control group and groups of patients with complete (group A) and incomplete (group B) interruption of the spinal cord in the lateral corticospinal tract. Values are presented as: mean±SD or median [Q1; Q3]

Показатель	А			В			Контроль
	острый период	подострый период	период восстановления	острый период	подострый период	период восстановления	
FA	0,57±0,04	0,61±0,06	0,57±0,05	0,65±0,03	0,62±0,04	0,59±0,05	0,64±0,06
AD, 10 ⁻³ мм ² /с	2,10 [1,40; 2,34]	1,90 [1,74; 2,32]	1,93 [1,86; 2,01]	1,97 [1,84; 2,21]	1,93 [1,81; 1,97]	2,02 [1,84; 2,08]	1,98 [1,85; 2,04]
MD, 10 ⁻³ мм ² /с	1,2±0,3	1,2±0,3	1,08 [1,07; 1,22]	1,10±0,14	1,06±0,07	1,12 [1,01; 1,16]	1,09±0,08
RD, 10 ⁻³ мм ² /с	0,8±0,2	0,7±0,2	0,71 [0,68; 0,82]	0,64±0,14	0,61±0,14	0,65 [0,59; 0,74]	0,63±0,08

Наиболее выраженные изменения происходят в зоне травмы, однако в неповрежденных отделах спинного мозга также происходят события, связанные с дегенерацией и демиелинизацией поврежденных аксонов [16–18]. Описанная Августом Уоллером [19] антероградная дегенерация в периферической нервной системе представляет собой патофизиологический процесс, включающий аксональную дегенерацию, распад миелиновой оболочки, за которым следует распад белка и липидов, составляющих миелин и удаление продуктов распада миелина и аксонов [20, 21]. По данным гистологии отек и истончение миелина обнаруживаются в перифокальных отделах уже

в острую стадию СМ травмы, а со временем эти процессы распространяются по спинному мозгу [22, 23]. Как было показано в исследованиях на животных, антероградная и ретроградная нейродегенерация различаются сроками пространственно-временного развития [21, 22, 24]. Процесс валлеровской дегенерации начинается сразу после травмы, при этом морфологические аксональные изменения происходят в течение первых 6 ч после аксотомии, а продукты распада миелиновой оболочки обнаруживаются уже через 48 ч после перерезки нервных волокон [20, 21, 25]. Было показано, что процесс продолжается в течение года после травмы, что в основном

Таблица 2

Значения параметров диффузии в различные сроки после травмы в группе контроля и группах пациентов с полным (группа А) и неполным (группа В) прерыванием спинного мозга в дорсальном канатике. Значения представлены в виде: среднее±SD или медиана [Q1; Q3]

Table 2

Values of diffusion parameters at different times after injury in the control group and groups of patients with complete (group A) and incomplete (group B) interruption of the spinal cord in the dorsal cord. Values are presented as: mean±SD or median [Q1; Q3]

Показатель	А			В			Контроль
	острый период	подострый период	период восстановления	острый период	подострый период	период восстановления	
FA	0,61±0,05	0,56±0,05	0,57±0,05	0,64±0,03	0,62±0,04	0,59±0,03	0,67±0,07
AD, 10 ⁻³ мм ² /с	2,01 [1,45; 2,14]	1,75 [1,68; 2,16]	1,86 [1,77; 2,01]	2,10 [2,01; 2,28]	1,80 [1,74; 2,52]	1,92 [1,89; 2,12]	2,01 [1,96; 2,10]
MD, 10 ⁻³ мм ² /с	1,1±0,3	1,06 [0,98; 1,26]	1,10±0,06	1,14±0,17	0,99 [0,97; 1,01]	1,12±0,07	1,10±0,12
RD, 10 ⁻³ мм ² /с	0,68±0,17	0,72±0,13	0,71±0,04	0,64±0,16	0,60±0,06	0,69±0,06	0,58±0,11

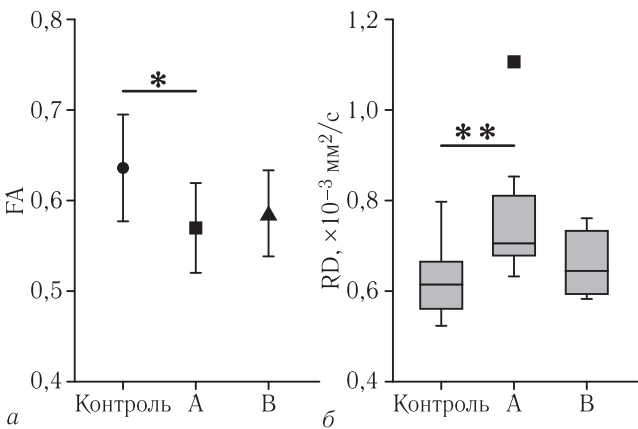


Рис. 2. Сравнение параметров FA (а) и RD (б) в латеральном кортикоспинальном тракте для групп контроля, А и В в период восстановления (90 и более дней после травмы): * p≤0,05; ** p≤0,01

Fig. 2. Comparison of FA (a) and RD (b) parameters in the lateral corticospinal tract for control groups, A and B during the recovery period (90 days or more after injury): * p≤0,05; ** p≤0,01

объясняется длительным очищением от клеточного детрита и, по-видимому, происходит медленнее в центральной, чем в периферической нервной системе [21, 25]. После повреждения аксонального волокна весь дистальный сегмент поражается валлеровской дегенерацией из-за потери связи с телом клетки [20–22]. Ретроградная дегенерация проявляется постепенной ретракцией и дегенерацией проксимального конца разорванного аксона [24]. Она включает в себя образование ретракционной луковицы на перерезанной культя аксона и возникновение дегенеративных изменений миелина [18]. Ретроградная дегенерация начинается в месте поражения и медленно прогрессирует по направлению к телу клетки, создавая нейродегенеративный градиент [26]. В частности, было обнаружено, что аксоны в пределах кортикоспинального тракта демонстрируют длительное отмирание [24].

На сегодняшний день проведено несколько зарубежных исследований, описывающих изменения

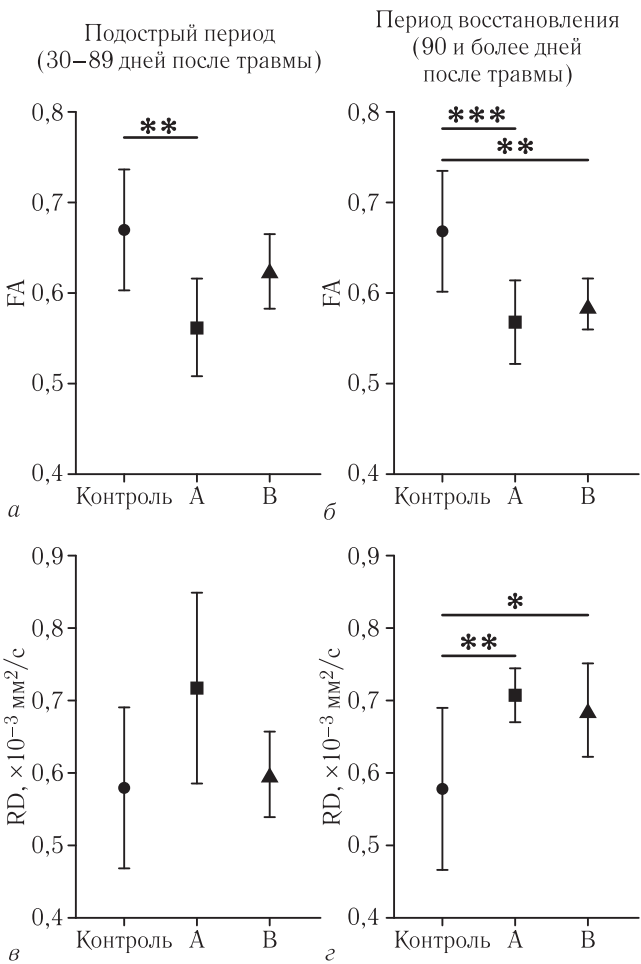


Рис. 3. Сравнение параметров FA (а, б) и RD (в, г) в дорсальном канатике для групп контроля, А и В в подострый период и период восстановления: * p≤0,05; ** p≤0,01; *** p≤0,001

Fig. 3. Comparison of parameters FA (a, б) and RD (в, г) in DC for control groups, A and B in the subacute period and recovery period: * p≤0,05; ** p≤0,01; *** p≤0,001

показателей ДТВ спинного мозга вне зон травмы. На ретроспективной выборке у детей с хронической травмой СМ анализ параметров диффузии в латеральных (двигательный), вентральном (двигатель-

ный) и дорсальном (сенсорный) трактах. Авторы [27] показали снижение FA и AD в проксимальных сегментах каудального отдела спинного мозга в двигательных и сенсорных трактах. В работе [28], проведенной на взрослой популяции, было получено значительное снижение среднего значения FA и увеличение MD в краниальных отделах кортикоспинального тракта у пациентов с травмой спинного мозга по сравнению с контрольной группой, что является результатом ретроградной дегенерации.

Авторы [29] получили статистически значимые различия в значениях параметром ДТВ в задних отделах полуовального центра при анализе данных пациентов с травмой спинного мозга и группой контроля. Кроме того, была обнаружена положительная корреляция моторных и сенсорных баллов по шкале ASIA со значением FA и отрицательная со значением ADC (apparent diffusion coefficient, исчисляемый коэффициент диффузии) полуовального центра.

В данной работе мы впервые исследовали параметры диффузии спинного мозга в дорсальных канатиках (сенсорные восходящие тракты) и латеральных кортикоспинальных трактах (моторные нисходящие) в шейном отделе у детей, получивших травму на грудном или поясничном уровне. Также необходимо отметить, что выбранная нами методика обработки позволила впервые провести анализ данных диффузии на всем протяжении вышеуказанных трактов в шейном отделе спинного мозга, а не в отдельно взятых областях интереса. Для оценки временных характеристик дегенеративных процессов пациенты были разделены на 3 группы в зависимости от сроков после травмы. Как и ожидалось, более выраженные дегенеративные процессы, проявляющиеся снижением значения FA, были обнаружены в группе пациентов с полным разрывом спинного мозга. Были подтверждены временные различия в протекании ретроградной и антеградной дегенерации.

Антеградная дегенерация дорсальных канатиков (сенсорные восходящие пути) обнаружена уже как в подострой стадии, так и в более поздние сроки в обеих группах, тогда как ретроградная дегенерация выявлялась в более поздние сроки после травмы и только в группе пациентов с полным перерывом спинного мозга.

Заключение. ДТВ с автоматической трехмерной обработкой данных является удобным инструментом для анализа посттравматического спинного мозга, поскольку позволяет не только обнаружить изменения, не видимые при других методах исследования, но и получить количественные характеристики, что позволяет на их основе сформировать объективные критерии оценки состояния спинного мозга, которые в дальнейшем могут быть использованы для контроля лечения и реабилитации детей со спинномозговой травмой.

Ограничения. Данное исследование имеет несколько ограничений.

1. Небольшое количество пациентов в остром и подостром периодах спинномозговой травмы ограничивают применение полученных результатов на более крупные популяции. Мы планируем продолжение начатого исследования для пополнения базы пациентов со спинномозговой травмой.

2. Особенность проведения МРТ — отказ от синхронизации с сердечной и дыхательной деятельностью из-за недопустимого увеличения времени исследования — приводит к появлению артефактов изображения, осложняющих построение четких карт диффузии. Решение данной проблемы лежит в усовершенствовании технологии получения данных ДТВ.

3. При текущей технологии получения данных ДТВ невозможно уменьшить размеры вокселя без увеличения времени сканирования. Решение данной технической задачи позволит исследовать более тонкие тракты спинного мозга.

Сведения об авторах:

Божко Ольга Васильевна — кандидат медицинских наук, старший научный сотрудник отдела лучевых методов диагностики государственного бюджетного учреждения здравоохранения города Москвы «Научно-исследовательский институт неотложной детской хирургии и травматологии Департамента здравоохранения города Москвы»; 119180, Москва, ул. Большая Полянка, д. 22; e-mail: bozhko_olga@mail.ru; ORCID 0000-0002-4709-9461;

Ублинский Максим Вадимович — кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник отдела лучевых методов диагностики государственного бюджетного учреждения здравоохранения города Москвы «Научно-исследовательский институт неотложной детской хирургии и травматологии Департамента здравоохранения города Москвы»; 119180, Москва, ул. Большая Полянка, д. 22; e-mail: maxublinsk@mail.ru; ORCID 0000-0002-4627-9874;

Ахадов Толибжон Абдуллаевич — доктор медицинских наук, профессор, руководитель отдела лучевых методов диагностики государственного бюджетного учреждения здравоохранения города Москвы «Научно-исследовательский институт неотложной детской хирургии и травматологии Департамента здравоохранения города Москвы»; 127562, Москва, ул. Каргопольская, д. 10; e-mail: akhadov@mail.ru; ORCID 0000-0002-3235-8854;

Воронкова Елена Валерьевна — научный сотрудник государственного бюджетного учреждения здравоохранения города Москвы «Научно-исследовательский институт неотложной детской хирургии и травматологии Департамента здравоохранения города Москвы»; 119180, Москва, ул. Большая Полянка, д. 22; e-mail: elena_voronkova13@mail.ru; ORCID 0000-0001-8016-0853;

Новоселова Ирина Наумовна — доктор медицинских наук, руководитель отделения физической реабилитации государственного бюджетного учреждения здравоохранения города Москвы «Научно-исследовательский институт неотложной детской хирургии и травматологии Департамента здравоохранения города Москвы»; 119180, Москва, ул. Большая Полянка, д. 22; e-mail: i.n.novoselova@gmail.com; ORCID 0000-0003-2258-2913;

Понина Ирина Витальевна — врач-педиатр отдела реабилитации государственного бюджетного учреждения здравоохранения города Москвы «Научно-исследовательский институт неотложной детской хирургии и травматологии Департамента здравоохранения города Москвы»; 119180, Москва, ул. Большая Полянка, д. 22; e-mail: ponina@doctor-roshal.ru; ORCID 0000-0002-0060-7895;

Кобзева Анна Александровна — врач-рентгенолог отдела лучевых методов диагностики государственного бюджетного учреждения здравоохранения города Москвы «Научно-исследовательский институт неотложной детской хирургии и травматологии Департамента здравоохранения города Москвы»; 119180, Москва, ул. Большая Полянка, д. 22; e-mail: kobzeva3@zdrav.mos.ru; ORCID 0009-0008-6637-5055;

Мельников Илья Андреевич — кандидат биологических наук, заведующий отделением КТ и МРТ государственного бюджетного учреждения здравоохранения города Москвы «Научно-исследовательский институт неотложной детской хирургии и травматологии Департамента здравоохранения города Москвы»; 119180, Москва, ул. Большая Полянка, д. 22; e-mail: iliamed@mail.ru; ORCID 0000-0002-2910-3711.

Information about the authors:

Olga V. Bozhko — Cand. of Sci. (Med.), Senior Researcher, Department of Radiation Diagnostic Methods, CRIEPST, 119180, Moscow, st. B. Polyanka 22; e-mail: bozhko_olga@mail.ru; ORCID 0000-0002-4709-9461;

Maxim V. Ublinsky — Cand. of Sci. (Biol.), Leading Researcher, Department of Radiation Diagnostic Methods, CRIEPST, 119180, Moscow, st. Bolshaya Polyanka, 22; e-mail: maxublinsk@mail.ru; ORCID 0000-0002-4627-9874;

Tolibdzhon A. Akhadov — Dr. of Sci. (Med.), Professor, Head of the Department of Radiation Diagnostic Methods, CRIEPST, Moscow, Kargopolskaya St. 10; e-mail: akhadov@mail.ru; ORCID 0000-0002-3235-8854;

Elena V. Voronkova — research fellow, CRIEPST, 119180, Moscow, st. B. Polyanka, 22; e-mail: elena_voronkova13@mail.ru; ORCID 0000-0001-8016-0853;

Irina N. Novoselova — Dr. of Sci. (Med.), Head of the Physical Rehabilitation Department, CRIEPST, 119180, Moscow, st. Bolshaya Polyanka, 22; e-mail: i.n.novoselova@gmail.com; ORCID 0000-0003-2258-2913;

Irina V. Ponina — pediatrician, Rehabilitation Department, CRIEPST, 119180, Moscow, st. Bolshaya Polyanka, 22; e-mail: ponina@doctor-roshal.ru; ORCID 0000-0002-0060-7895;

Anna A. Kobzeva — radiologist, department of Radiation diagnostic methods, CRIEPST, 119180, Moscow, Bolshaya Polyanka St., 22; e-mail: kobzeva3@zdrav.mos.ru; ORCID 0009-0008-6637-5055;

Ilya A. Melnikov — Cand. of Sci. (Biol.), Head of CT and MRI Department, CRIEPST, 119180, Moscow, Bolshaya Polyanka St., 22; e-mail: iliamed@mail.ru; ORCID 0000-0002-2910-3711.

Вклад авторов. Все авторы подтверждают соответствие своего авторства, согласно международным критериям ICMJE (все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией). Наибольший вклад распределен следующим образом: концепция и дизайн исследования — Т.А. Ахадов, О.В. Божко, М.В. Ублинский, И.Н. Новоселова; сбор и анализ материала — О.В. Божко, М.В. Ублинский, Е.В. Воронкова, А.А. Кобзева, И.А. Мельников, И.В. Понина; подготовка рукописи — О.В. Божко, М.В. Ублинский, Т.А. Ахадов, И.Н. Новоселова.

Contribution of authors. All authors confirm their authorship according to the international ICMJE criteria (all authors made substantial contributions to the conception, research, and preparation of the article, and read and approved the final version before publication). Special contribution: concept and research plan — TAA, OVB, MVU, INN; data collection and analysis — OVB, MVU, EVV, AAK, IAM, IVP; preparation of the manuscript — OVB, MVU, TAA, INN.

Потенциальный конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Disclosure: the authors declare that they have no competing interests.

Финансовая поддержка: исследование поддержано грантом Департамента здравоохранения города Москвы № 2112-9/22.

Financial support: the study was supported by grant from the Moscow Department of Health No. 2112-9/22.

Соответствие принципам этики: исследование было одобрено локальным Комитетом института по этике (протокол № 1 от 10.03.2022). Информированное согласие было получено от всех участников, включенных в исследование, или их законных представителей.

Adherence to ethical standards: the study was approved by the local Ethics Committee of the Institute (Protocol No. 1 dated 10.03.2022). Informed consent was obtained from all participants included in the study or their legal representatives.

Поступила/Received: 28.11.2024

Принята к печати/Accepted: 28.02.2025

Опубликована/Published: 29.03.2025

ЛИТЕРАТУРА/REFERENCES

1. Kim C., Vassilyadi M., Forbes J.K., Moroz N.W., Camacho A., Moroz P.J. Traumatic spinal injuries in children at a single level 1 pediatric trauma centre: report of a 23-year experience // *Can. J. Surg.* 2016. Vol. 59, No. 3. P. 205–212. doi: 10.1503/cjs.014515.
2. Залетина А.В., Виссарионов С.В., Баиндурашвили А.Г., Кокушин Д.Н., Соловьёва К.С. Повреждения позвоночника и спинного мозга у детского населения // *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований.* 2017. Т. 12, № 1. С. 69–73. [Zaletina A.V., Vissarionov S.V., Baindurashvili A.G., Kokushin D.N., Solovyova K.S. Damage to the spine and spinal cord in children. *International Journal of Applied and Fundamental Research*, 2017, Vol. 12, No. 1, pp. 69–73 (In Russ.)]. doi: 10.17513/mjprfi.11965.
3. Понина И.В., Новоселова И.Н., Валиуллина С.А., Ахадов Т.А., Божко О.В., Лукьянов В.И., Попова О.В. Особенности нутритивного статуса детей с позвоночно-спинномозговой травмой на ранних этапах восстановления // *Российский педиатрический журнал.* 2022. Т. 25, № 5. С. 333–336. [Ponina I.V.,

- Novoselova I.N., Valiullina S.A., Akhadow T.A., Bozhko O.V., Lukyanov V.I., Popova O.V. Features of the nutritional status of children with spinal cord injury in the early stages of recovery. *Russian pediatric journal*, 2022, Vol. 25, No. 5, pp. 333–336 (In Russ.). doi: 10.46563/1560-9561-2022-25-5-333-336.
4. Beirowski B., Adalbert R., Wagner D., Grumme D.S., Addicks K., Ribchester R.R. et al. The progressive nature of Wallerian degeneration in wild-type and slow Wallerian degeneration (WldS) nerves // *BMC Neurosci.* 2005. Vol. 6. P. 6. doi: 10.1186/1471-2202-6-6.
 5. Buss A., Brook G.A., Kakulas B., Martin D., Franzen R., Schoenen J. et al. Gradual loss of myelin and formation of an astrocytic scar during Wallerian degeneration in the human spinal cord // *Brain*. 2004. Vol. 127, No. 1. P. 34–44. doi: 10.1093/brain/awh001.
 6. Божко О.В., Ублинский М.В., Ахадов Т.А., Воронкова Е.В., Кобзева А.А., Мельников И.А. Диффузионно-тензорная визуализация спинного мозга у здоровых детей // Российский педиатрический журнал. 2024. Т. 27, № 5. С. 350–355. [Bozhko O.V., Ublinsky M.V., Akhadow T.A., Voronkova E.V., Kobzeva A.A., Melnikov I.A. Diffusion tensor imaging of the spinal cord in healthy children. *Russian Pediatric Journal*, 2024, Vol. 27, No. 5, pp. 350–355 (In Russ.).] doi: 10.46563/1560-9561-2024-27-5-350-355.
 7. Dong Q., Welsh R.C., Chenevert T.L., Carlos R.C., Maly-Sundgren P., Gomez-Hassan D.M. et al. Clinical applications of diffusion tensor imaging // *J. Magn Reson Imaging*. 2004. Vol. 19, No. 1. P. 6–18. doi: 10.1002/jmri.10424.
 8. Ахадов Т.А., Ублинский М.В., Каньшина Д.С., Божко О.В., Мельников И.А., Гачок И.В. и др. Диффузионная магнитно-резонансная визуализация для оценки состояния спинного мозга: физические и технические основы, клинический опыт: учебное пособие. М.: ИП Горшенева А.В., 2024. 86 с. [Akhadow T.A., Ublinsky M.V., Kanchina D.S., Bozhko O.V., Melnikov I.A., Gachok I.V. et al. Diffusion magnetic resonance imaging for assessing the state of the spinal brain: physical and technical fundamentals, clinical experience: textbook. Moscow: IP Gorsheneva A.V., 2024. 86 p. (In Russ.).] ISBN 978-5-6044538-5-8.
 9. Fiani B., Noblett C., Nanney J., Doan T., Pennington E., Jarrah R. et al. Diffusion tensor imaging of the spinal cord status post trauma // *Surg. Neurol. Int.* 2020. Vol. 11. P. 276. doi: 10.25259/SNI_495_2020.
 10. Mulcahey M.J., Samdani A., Gaughan J., Barakat N., Faro S., Betz R.R. et al. Diffusion tensor imaging in pediatric spinal cord injury: Preliminary examination of reliability and clinical correlation // *Spine (Phila Pa 1976)*. 2012. Vol. 37, No. 13. P. 797. doi: 10.1097/BRS.0b013e3182470a08.
 11. Mulcahey M.J., Samdani A.F., Gaughan J.P., Barakat N., Faro S., Shah P. et al. Diagnostic accuracy of diffusion tensor imaging for pediatric cervical spinal cord injury // *Spinal Cord*. 2013. Vol. 51, No. 7. P. 532–537. doi: 10.1038/sc.2013.36.
 12. Krisa L., Middleton D.M., Saksena S., Faro S.H., Leiby B.E., Mohamed F.B. et al. Clinical Utility of Diffusion Tensor Imaging as a Biomarker to Identify Microstructural Changes in Pediatric Spinal Cord Injury // *Top Spinal. Cord Inj. Rehabil.* 2022. Vol. 28, No. 2. P. 1–12. doi: 10.46292/sci21-00048.
 13. Roberts T.T., Leonard G.R., Cepela D.J. Classifications In Brief: American Spinal Injury Association (ASIA) Impairment Scale // *Clin. Orthop. Relat. Res.* 2017. Vol. 475, No. 5. P. 1499–1504. doi: 10.1007/s11999-016-5133-4.
 14. Wilm B.J., Gamper U., Henning A., Pruessmann K.P., Kollias S.S., Boesiger P. Diffusion-weighted imaging of the entire spinal cord // *NMR Biomed.* 2009. Vol. 22, No. 2. P. 174–181. doi: 10.1002/nbm.1298.
 15. De Leener B., Lévy S., Dupont S.M., Fonov V.S., Stikov N., Louis Collins D. et al. SCT: Spinal Cord Toolbox, an open-source software for processing spinal cord MRI data // *Neuroimage*. 2017. Vol. 145, Pt A. P. 24–43. doi: 10.1016/j.neuroimage.2016.10.009.
 16. David G., Pfyffer D., Vallotton K., Plender N., Thompson A., Weiskopf N. et al. Longitudinal changes of spinal cord grey and white matter following spinal cord injury // *J. Neurol Neurosurg Psychiatry*. 2021. Vol. 92, No. 11. P. 1222–1230. doi: 10.1136/jnnp-2021-326337.
 17. Freund P., Seif M., Weiskopf N., Friston K., Fehlings M.G., Thompson A.J. et al. MRI in traumatic spinal cord injury: from clinical assessment to neuroimaging biomarkers // *Lancet Neurol.* 2019. Vol. 18. № 12. P. 1123–1135. doi: 10.1016/S1474-4422(19)30138-3.
 18. Seif M., Ziegler G., Freund P. Progressive Ventricles Enlargement and Cerebrospinal Fluid Volume Increases as a Marker of Neurodegeneration in Patients with Spinal Cord Injury: A Longitudinal Magnetic Resonance Imaging Study. // *J. Neurotrauma*. 2018. Vol. 35, No. 24. P. 2941–2946. doi: 10.1089/neu.2017.5522.
 19. Fissel J.A., Farah M.H. The influence of BACE1 on macrophage recruitment and activity in the injured peripheral nerve // *J. Neuroinflammation*. 2021. Vol. 18, No. 1. P. 71. doi: 10.1186/s12974-021-02121-2.
 20. Tian R., Zhou Y., Ren Y., Zhang Y., Tang W. Wallerian degeneration: From mechanism to disease to imaging. // *Heliyon*. 2024. Vol. 11, No. 1. e40729. doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e40729.
 21. Fischer T., Stern C., Freund P., Schubert M., Sutter R. Wallerian degeneration in cervical spinal cord tracts is commonly seen in routine T2-weighted MRI after traumatic spinal cord injury and is associated with impairment in a retrospective study // *Eur. Radiol.* 2021. Vol. 31, No. 5. P. 2923–2932. doi: 10.1007/s00330-020-07388-2.
 22. Poulen G., Perrin F.E. Advances in spinal cord injury: insights from non-human primates // *Neural Regen Res.* 2024. Vol. 19, No. 11. P. 2354–2364. doi: 10.4103/NRR.NRR-D-23-01505.
 23. Grumbles R.M., Thomas C.K. Motoneuron Death after Human Spinal Cord Injury // *J. Neurotrauma*. 2017. Vol. 34, No. 3. P. 581–590. doi: 10.1089/neu.2015.4374.
 24. Hill CE. A view from the ending: Axonal dieback and regeneration following SCI // *Neurosci. Lett.* 2017. Vol. 652. P. 11–24. doi: 10.1016/j.neulet.2016.11.002.
 25. Beirowski B., Nógrádi A., Babetto E., Garcia-Alias G., Coleman M.P. Mechanisms of axonal spheroid formation in central nervous system Wallerian degeneration // *J. Neuropathol. Exp. Neurol.* 2010. Vol. 69, No. 5. P. 455–472. doi: 10.1097/NEN.0b013e3181da84db.
 26. DeFrancesco-Lisowitz A., Lindborg J.A., Niemi J.P., Zigmond R.E. The neuroimmunology of degeneration and regeneration in the peripheral nervous system // *Neuroscience*. 2015. Vol. 302. P. 174–203. doi: 10.1016/j.neuroscience.2014.09.027.
 27. Schading S., Emmenegger T.M., Freund P. Improving Diagnostic Workup Following Traumatic Spinal Cord Injury: Advances in Biomarkers // *Curr. Neurol. Neurosci. Rep.* 2021. Vol. 21, No. 9. P. 49. doi: 10.1007/s11910-021-01134-x.
 28. Guleria S., Gupta R.K., Saksena S., Chandra A., Srivastava R.N., Husain M. et al. Retrograde Wallerian degeneration of cranial corticospinal tracts in cervical spinal cord injury patients using diffusion tensor imaging // *J. Neurosci Res.* 2008. Vol. 86, No. 10. P. 2271–2280. doi: 10.1002/jnr.21664.
 29. Koskinen E., Brander A., Hakulinen U., Luoto T., Helminen M., Ylinen A. et al. Assessing the state of chronic spinal cord injury using diffusion tensor imaging // *J. Neurotrauma*. 2013. Vol. 30, No. 18. P. 1587–1595. doi: 10.1089/neu.2013.2943.