

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**

ГБУЗ «Научно-исследовательский институт неотложной детской хирургии и травматологии» Департамента здравоохранения Москвы, 119180, Москва, Россия

Резюме

Введение. Диффузионно-тензорная визуализация (ДТВ) — методика, позволяющая оценить диффузию молекул воды вдоль миелиновой оболочки нервных волокон и получить информацию о целостности проводящих путей головного и спинного мозга (СМ). Получение воспроизводимых значений параметров диффузии является актуальной и выполнимой задачей. **Цель** работы — определить значения параметров ДТВ на всём протяжении СМ у здоровых детей для использования при оценке острой травмы, её последствий и других форм патологии СМ.

Материалы и методы. Обследовано 15 условно здоровых детей в возрасте 13–18 лет, из них 6 девочек, 8 мальчиков, средний возраст $15,2 \pm 1,2$ года. Разработан протокол МРТ позвоночника для охвата всего объёма СМ с раздельной визуализацией шейного и грудного отделов позвоночника (длительность — 9 мин 48 с). Проведены построение карт и расчёт параметров диффузии: фракционной анизотропии (ФА), медиальной (МД), продольной или аксиальной (АД) и поперечной (ПД) диффузии. Для получения ДТВ-изображений использовали последовательность «IRIS ZOOM» («Philips»), для обработки данных — программный пакет «Spinal Cord Toolbox», для статистического анализа — программное обеспечение «GraphPad Prism», значимость критериев определяли на уровне $p < 0,05$.

Результаты. Средние значения параметров СМ детей составили: $ФА = 0,63 \pm 0,06$; $АД = 2,1 \pm 0,3 \times 10^{-3} \text{ мм}^2/\text{с}$; $МД = 1,15 \pm 0,16 \times 10^{-3} \text{ мм}^2/\text{с}$; $ПД = 0,68 \pm 0,12 \times 10^{-3} \text{ мм}^2/\text{с}$. При этом выявлено повышение ФА на уровне Th2–Th9 по сравнению со значениями на уровнях C6–Th1 и Th10–Th12. Коэффициент АД на уровне Th2–Th9 был повышен относительно уровней C2–C5 и C6–Th1. Значения МД в зонах СМ на уровнях Th2–Th9 и Th10–Th12 были повышены относительно более высоких уровней СМ. Значения ПД в зоне на уровне Th10–Th12 повышены относительно всех остальных зон.

Заключение. Определены показатели диффузии СМ детей в возрасте 12–18 лет и выявлены небольшие различия между областями СМ. Установленные значения могут быть использованы как референтные для оценки состояния СМ при различных формах патологии (травмах, демиелинизирующих и опухолевых заболеваниях) у детей соответствующей возрастной группы.

Ключевые слова: диффузионно-тензорная визуализация; магнитно-резонансная томография; дети; спинной мозг

Для цитирования: 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; 27(5): 350–355. <https://doi.org/10.46563/1560-9561-2024-27-5-350-355> <https://elibrary.ru/mszoub>

Для корреспонденции: Максим Вадимович Ублинский, канд. биол. наук, ст. науч. сотр., ГБУЗ «НИИ НДХиТ» ДЗ г. Москвы, maxublinsk@mail.ru

Участие авторов: Ахадов Т.А., Божко О.В., Ублинский М.В. — концепция и дизайн исследования; Божко О.В., Ублинский М.В., Кобзева А.А., Мельников И.А. — проведение исследования; Божко О.В., Ублинский М.В., Воронкова Е.В. — сбор и обработка материала; Ублинский М.В., Воронкова Е.В. — статистическая обработка; Божко О.В. — написание текста; Ахадов Т.А., Ублинский М.В. — редактирование; Ахадов Т.А., Божко О.В., Ублинский М.В. — утверждение окончательного варианта статьи. Все соавторы — ответственность за целостность всех частей статьи.

Финансирование. Исследование поддержано грантом Департамента здравоохранения города Москвы № 2112-9/22.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила 27.09.2024
Принята к печати 08.10.2024
Опубликована 12.11.2024

Olga V. Bozhko, Maksim V. Ublinskiy, Tolibjon A. Akhadov, Elena V. Voronkova, Anna A. Kobzeva, Iliya A. Melnikov**Diffusion tensor imaging of spinal cord in healthy children**

Clinical and Research Institute of Emergency Pediatric Surgery and Trauma, Moscow, 119180, Russian Federation

Summary

Introduction. Diffusion tensor imaging (DTI) is a technique that allows evaluating diffusion of water molecules along the myelin sheath of nerve fibers and obtaining information about the integrity of brain and spinal cord pathways. Obtaining reproducible values of diffusion parameters is an urgent and feasible task. **The aim** of this study was to establish the values of DTI parameters along the entire length of the spinal cord in healthy children for further use in the assessment of acute injury, its consequences and other spinal cord diseases.

Materials and methods. The study included fifteen healthy patients of 13 to 18 years, including 6 girls and 8 boys, average age was 15.2 ± 1.2 years. The study was performed on a Philips Achieva dStream 3T MRI scanner (Netherlands). As part of this study, a spine MRI protocol was developed to cover the entire volume of spinal cord with separate visualization of cervical and thoracic spine (duration: 9 min 48 sec). The IRIS ZOOM sequence (Philips) was used to obtain DTI images. Spinal Cord Toolbox software package was used to process the data. Statistical analysis was performed using GraphPad Prism software, and significance was determined at $p < 0.05$.

Results. Mapping and calculation of the following diffusion parameters: fractional anisotropy (FA), medial (MD), longitudinal or axial (AD) and transverse (RD) diffusion showed the average values of the parameters FA, AD, MD, RD of the spinal cord of children to be: FA, AD, MD, RD of spinal cord were: $ФА = 0.63 \pm 0.06$, $АД = 2.1 \pm 0.3 \times 10^{-3} \text{ мм}^2/\text{с}$, $МД = 1.15 \pm 0.16 \times 10^{-3} \text{ мм}^2/\text{с}$, $RD = 0.68 \pm 0.12 \times 10^{-3} \text{ мм}^2/\text{с}$. An increase in FA was detected at the Th2–Th9 level compared to the values at the C6–Th1 and

Th10–Th12 levels. The AD coefficient at the Th2–Th9 level is increased relative to the C2–C5 and C6–Th1 levels. MD values in spinal cord areas at the Th2–Th9 and Th10–Th12 levels are statistically higher relative to higher levels of the spinal cord. RD values in the zone at the Th10–Th12 level are increased relative to all other areas.

Conclusion. The study established the diffusion indices of FA, MD, AD, RD of spinal cord in children aged 12 to 18 years and showed small differences between the spinal cord regions. The data obtained can be used as reference values for assessing spinal cord condition in various pathological processes (trauma, demyelinating and tumor diseases) in children for the corresponding age group.

Keywords: *diffusion tensor imaging; magnetic resonance imaging; children; spinal cord*

For citation: Bozhko O.V., Ublinskiy M.V., Akhadov T.A., Voronkova E.V., Kobzeva A.A., Melnikov I.A. Diffusion tensor imaging of spinal cord in healthy children. *Rossiyskiy Pediatricheskiy zhurnal (Russian Pediatric Journal)*. 2024; 27(5): 350–355. (In Russian). <https://doi.org/10.46563/1560-9561-2024-27-5-350-355> <https://elibrary.ru/mszoub>

For correspondence: Maxim V. Ublinskiy, PhD, radiologist, scientific researcher, Clinical and Research Institute of Emergency Pediatric Surgery and Trauma, Moscow, 119180, Russian Federation, maxublinsk@mail.ru

Contribution: Akhadov T.A., Bozhko O.V., Ublinskiy M.V. — research concept and design; Bozhko O.V., Ublinskiy M.V., Kobzeva A.A., Melnikov I.A. — conducting research; Bozhko O.V., Ublinskiy M.V., Voronkova E.V. — collection and analysis of data; Ublinskiy M.V., Voronkova E.V. — statistical analysis; Bozhko O.V. — writing the text; Akhadov T.A., Ublinskiy M.V. — editing the text; Akhadov T.A., Bozhko O.V., Ublinskiy M.V. — approval of the final version of the article. All co-authors — responsibility for the integrity of all parts of the article.

Information about the authors:

Bozhko O.V., <https://orcid.org/0000-0002-4709-9461>

Ublinskiy M.V., <https://orcid.org/0000-0002-4627-9874>

Akhadov T.A., <https://orcid.org/0000-0002-3235-8854>

Voronkova E.V., <https://orcid.org/0000-0001-8016-0853>

Kobzeva A.A., <https://orcid.org/0009-0008-6637-5055>

Melnikov I.A., <https://orcid.org/0000-0002-2910-3711>

Acknowledgment. The study was supported by grant from the Moscow Department of Health No. 2112-9/22.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Received: September 27, 2024

Accepted: October 08, 2024

Published: November 12, 2024

Введение

Магнитно-резонансная томография (МРТ) является информативным визуальным методом исследования спинного мозга (СМ) [1–3]. Информация, полученная при структурной МРТ за счёт использования импульсных спин-эхо T1- и T2-последовательностей, а также последовательности инверсии-восстановления спинного эха, достаточно чётко и полноценно отображает анатомическую структуру СМ и позволяет установить или предположить наличие макроскопических патологических изменений. Однако для ряда аномалий или повреждений СМ у детей данных структурной МРТ недостаточно для получения полноценной информации о микроскопических и функциональных изменениях. Включение в протокол обследования больных методики диффузионно-тензорной визуализации (ДТВ) расширяет возможности для анализа изменений СМ, в частности это относится к выявлению цитотоксического отёка, определения целостности трактов белого вещества [4–6]. Кроме того, ДТВ — это метод получения количественной информации о состоянии тканей, что позволяет проводить статистический анализ между соответствующими данными для нормы и патологии [7–9]. Ограниченное использование диффузионной МРТ при обследовании СМ у детей связано с трудностями получения качественных изображений, что объясняется анатомическими особенностями СМ (малое поперечное сечение СМ, близкое расположение костных структур и жировой клетчатки), приводящими к неоднородности магнитного поля. Кроме того, пульсирующие движения цереброспинальной жидкости и динамические изменения сердца и лёгких обуславливают значительные ар-

тефакты и технические трудности при измерении диффузии воды в СМ [10–12]. Несмотря на упомянутые ограничения, получение воспроизводимых значений параметров диффузии является актуальной и выполнимой задачей.

Цель работы: определить значения параметров ДТВ на всём протяжении СМ у здоровых детей для использования при оценке острой травмы, её последствий и других форм патологии СМ.

Материалы и методы

Обследовано 15 условно здоровых детей в возрасте 13–18 лет, из них 6 девочек, 8 мальчиков, средний возраст — $15,2 \pm 1,2$ года. Детям были разъяснены цели обследования и процедура его выполнения, было получено добровольное письменное информирование согласие на участие в работе от детей и/или их законных представителей. Исследование выполнено на МР-томографе «Philips Achieva dStream 3T» («Philips»). Передача радиочастотного сигнала осуществлялась при помощи встроенной в сканер катушки для тела (Q-Body). Для приёма сигнала использовались радиочастотные катушки, исходя из исследуемой области: для шейного отдела позвоночника — 15-канальная приёмная катушка «голова-шея»; для грудного отдела позвоночника — катушка, встроенная в стол пациента, и 16-канальная поверхностная катушка. Позиционирование зон сканирования представлено на **рис. 1**.

Нами разработан протокол МРТ позвоночника для охвата всего объёма СМ с отдельной визуализацией шейного и грудного отделов позвоночника. В соответствии с протоколом в первую очередь необходимо получить анатомические диагностические изображе-

ния шейной и грудной частей СМ (сагиттальные трёхмерные T2-взвешенные изображения — 3D-T2-ВИ). Далее для получения ДТВ-изображений используется специализированная эхо-планарная импульсная последовательность IRIS ZOOM («Philips») [13] 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. Длительность сканирования по данному протоколу составила 9 мин

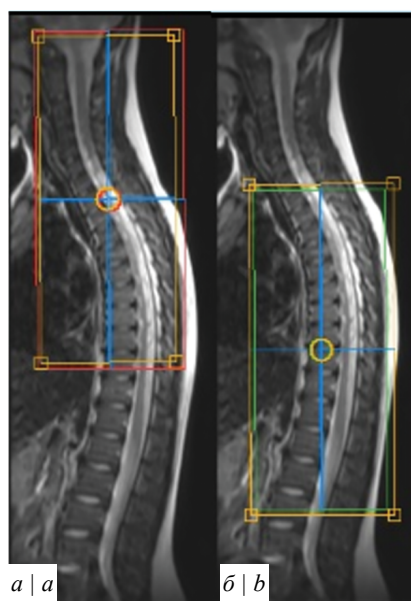


Рис. 1. Планирование зон сканирования шейного и верхнегрудного отделов позвоночника (а), грудного отдела позвоночника (б).

Fig. 1. Planning of the scanning areas of a) the cervical and upper thoracic spine, b) the thoracic spine.

48 с. Общее время обследования в зависимости от выбранных уровней СМ — 20–40 мин.

Создан протокол обработки данных ДТВ в программном пакете «Spinal Cord Toolbox» (SCT), реализованном на Python [14]:

- сегментация T2-ВИ с целью выделения изображения СМ;
- регистрация сегментированного СМ к встроенному атласу SCT; применение специальной центральной маски к первичным данным ДТВ для исключения изображения за пределами СМ;
- сегментация диффузионно-взвешенных изображений с целью выделения изображения СМ;
- автоматическая коррекция данных сегментации из пунктов 2 и 3;
- устранение артефактов движения данных ДТВ с помощью автоматизированного алгоритма;
- регистрация сегментированного скорректированного СМ к встроенному атласу SCT;
- построение карт и расчёт параметров диффузии: фракционной анизотропии (ФА), медиальной (МД), продольной или аксиальной (АД) и поперечной (ПД) диффузии [15];
- получение количественных результатов на выбранных уровнях СМ.

На **рис. 2** представлен пример построения карты диффузии СМ испытуемого в SCT.

Статистический анализ параметров диффузии на разных уровнях СМ проводили с использованием программного обеспечения «GraphPad Prism». Проверку данных на нормальность осуществляли с помощью критерия Шапиро–Уилка. Для межгруппового сравнения применяли дисперсионный анализ ANOVA и тест Тьюки в случае нормального распределения данных (ФА и ПД) и критерий Краскела–Уоллиса и тест Данна в случае ненормального распределения данных (АД и МД). Значимость критериев определяли на уровне $p < 0,05$.

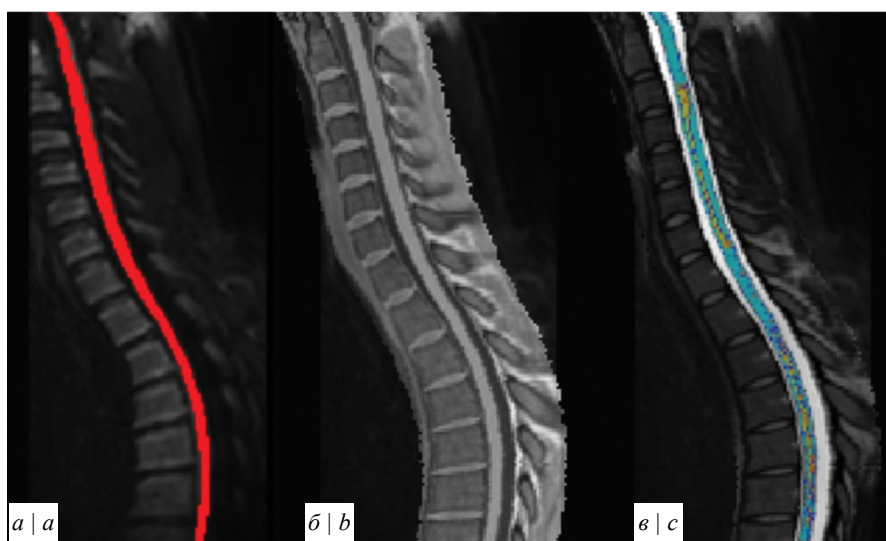


Рис. 2. Обработка данных ДТВ в программе SCT.

а — сегментация СМ; б — регистрация сегментированного скорректированного СМ к встроенному атласу SCT; в — построение диффузионной карты СМ.

Fig. 2. DTV data processing in the SCT software.

а — segmentation of the spinal cord; б — registration of the segmented corrected spinal cord to the SCT atlas built-in; в — construction of a diffusion chart of the spinal cord.

Результаты

Полноценное обследование для каждого испытуемого включало получение данных ДТВ шейно-верхнегрудной и грудной частей СМ и поясничного утолщения. У 1 из 15 испытуемых из-за выраженных артефактов движения шейной части СМ (смещение положения СМ в томографе во время обследования более чем на 5 мм) сделали невозможным получение адекватных данных, в то время как полученные данные для грудной части СМ были оценены как приемлемые. Анализ диффузионных данных СМ осуществляли с уровня С2 до уровня Th12. Значения параметров диффузии СМ были получены на уровне каждого позвонка.

Установлено, что значения параметров диффузии неравнозначны на протяжении всего СМ. В первую очередь это относится к значениям ФА. Были выделены зоны со сходными значениями ФА: низкими — в шейном и поясничном утолщениях, наиболее высокими — в грудном отделе СМ. На основании этих данных в СМ детей нами были выделены 4 зоны, в которых определены средние значения параметров диффузии. Средние значения параметров диффузии СМ от С2 до Th12, а также на уровнях С2–С5, С6–Th1, Th2–Th9, Th10–Th12 представлены в **табл. 1**.

Результаты статистического анализа сравнения параметров диффузии в различных отделах СМ представлены в **табл. 2**.

Как показано в **табл. 2**, параметр ФА имеет более высокие значения в зоне СМ на уровне Th2–Th9 по от-

ношению к уровням С6–Th1 и Th10–Th12 (**рис. 3, а**). Коэффициент продольной диффузии АД на уровне Th2–Th9 повышен относительно уровней С2–С5 и С6–Th1 (**рис. 3, б**). Значения МД в зонах СМ на уровнях Th2–Th9 и Th10–Th12 были повышены относительно более высоких уровней (**рис. 3, в**). Значения ПД в зоне СМ на уровне Th10–Th12 повышены относительно всех остальных зон (**рис. 3, г**).

Обсуждение

Проведённые нами исследования показали, что использование специализированной последовательности сканирования IRIS ZOOM с подобранными оптимальными параметрами позволяет проводить качественное обследование СМ у детей за приемлемое время. Мы не выделяли конгломерации серого и белого вещества для получения параметров диффузии, поскольку такие измерения потребовали бы более высокого разрешения получаемых изображений, что, соответственно, ведёт к увеличению времени обследования, а фактор времени важен при проведении клинко-инструментальных анализов. По этой же причине не использовалась кардиосинхронизация, которая позволила бы улучшить качество изображений, но также привела бы к значительному увеличению времени обследования.

Полученные нами значения отличаются от данных, опубликованных другими авторами. Ранее у детей в возрасте 12–16 лет были получены следующие значения параметров диффузии СМ: ФА = $0,58 \pm 0,10$;

Таблица 1 / Table 1

Средние значения параметров диффузии в СМ на разных уровнях
Average values of diffusion parameters in the spinal cord at different levels

Уровень СМ Spinal cord levels	ФА Fraction anisotropy (FA)	АД, $\times 10^{-3}$ мм ² /с AD, $\times 10^{-3}$ mm ² /sec	МД, $\times 10^{-3}$ мм ² /с MD, $\times 10^{-3}$ mm ² /sec	ПД, $\times 10^{-3}$ мм ² /с RD, $\times 10^{-3}$ mm ² /sec
С2–С5	$0,64 \pm 0,05$	$2,0 \pm 0,3$	$1,05 \pm 0,14$	$0,60 \pm 0,10$
С6–Th1	$0,60 \pm 0,07$	$2,0 \pm 0,3$	$1,10 \pm 0,15$	$0,65 \pm 0,12$
Th2–Th9	$0,66 \pm 0,04$	$2,26 \pm 0,13$	$1,21 \pm 0,10$	$0,69 \pm 0,11$
Th10–Th12	$0,60 \pm 0,07$	$2,1 \pm 0,4$	$1,24 \pm 0,18$	$0,80 \pm 0,09$
С2–Th12	$0,63 \pm 0,06$	$2,1 \pm 0,3$	$1,15 \pm 0,16$	$0,68 \pm 0,12$

Таблица 2 / Table 2

Сравнение значений параметров диффузии между разными зонами СМ
Comparison of the values of the diffusion parameters between different spinal cord zones

Уровни СМ Spinal cord levels	ФА FA	АД AD	МД MD	ПД RD
С2–С5 vs. С6–Th1	N. s.	N. s.	N. s.	N. s.
С2–С5 vs. Th2–Th9	N. s.	$p \leq 0,01$	$p \leq 0,01$	N. s.
С2–С5 vs. Th10–Th12	N. s.	N. s.	$p \leq 0,01$	$p \leq 0,0001$
С6–Th1 vs. Th2–Th9	$p \leq 0,05$	$p \leq 0,01$	$p \leq 0,05$	N. s.
С6–Th1 vs. Th10–Th12	N. s.	N. s.	N. s.	$p \leq 0,01$
Th2–Th9 vs. Th10–Th12	$p \leq 0,05$	N. s.	N. s.	$p \leq 0,05$

Примечание. N. s. — недостоверно.

Note. N. s. — not significant.

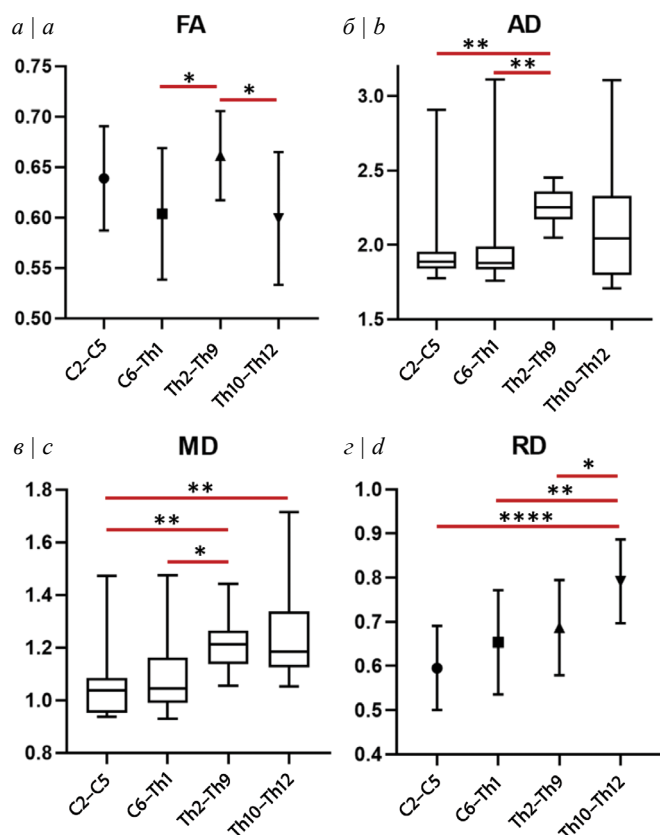


Рис. 3. Сравнение значений ФА (а), АД (б), МД (в) и ПД (г) в различных частях СМ.

* $p \leq 0,05$; ** $p \leq 0,01$; **** $p \leq 0,0001$.

Fig. 3. Comparison of FA (a), AD (b), MD (c), and RD (c) values in different areas.

* $p \leq 0,05$; ** $p \leq 0,01$; **** $p \leq 0,0001$.

АД = $1,58 \pm 0,38$ ($\times 10^{-3}$ мм²/с); МД = $0,91 \pm 0,21$ ($\times 10^{-3}$ мм²/с); ПД = $0,58 \pm 0,17$ ($\times 10^{-3}$ мм²/с) [16]. N. Barakat и соавт. для группы детей в возрасте 7–21 года получили следующие значения параметров диффузии: ФА = $0,50 \pm 0,11$; АД = $0,97 \pm 0,20$ ($\times 10^{-3}$ мм²/с); МД = $0,59 \pm 0,15$ ($\times 10^{-3}$ мм²/с); ПД = $0,41 \pm 0,13$ ($\times 10^{-3}$ мм²/с) [17]. Мы считаем, что причина расхождения абсолютных значений данных параметров в разных работах заключается в различиях выборки испытуемых, разных условиях получения данных (МР-томографы, программное обеспечение), а также различий используемых программ обработки данных. По нашему мнению, тем группам, которые системно занимаются заболеваниями СМ, следует определить стандартные условия получения и обработки результатов ДТВ СМ, исходя из технических возможностей доступных им МР-систем. Это позволит создать собственную базу значений параметров диффузии для группы нормы, которую в дальнейшем можно с высокой степенью значимости использовать при обследованиях СМ при различных формах его патологии.

Наши данные демонстрируют небольшие, но существенные различия значений ФА между шейным, грудным и поясничным отделами СМ у условно здоровых детей. Эти наблюдения согласуются с ранее опубликованными данными [16, 18]. Этот феномен

можно объяснить наличием большего объема серого вещества в шейном и пояснично-крестцовом утолщениях СМ, где расположены нейроны, которые иннервируют конечности [19]. По имеющимся данным, объем серого вещества в среднем составляет 18% СМ в месте отхождения нервных корешков от C2 до C8 и только 13,2% — на уровне Th1–Th12 [20]. Кроме того, объем белого вещества СМ постепенно уменьшается в каудальном направлении, т. к. длинные восходящие и нисходящие проводящие пути содержат меньше аксонов на последовательно более каудальных уровнях СМ [19]. При сравнении показателей ДТВ на различных уровнях СМ нами установлены более низкие значения ФА на уровне шейного и пояснично-крестцового утолщений, что обусловлено увеличением соотношения серого вещества к белому в этих отделах. Значения аксиальной диффузии на всех уровнях СМ были выше, чем радиальной. Это связано с диффузионными барьерами (клеточные мембраны и миелиновая оболочка аксонов), возникающими при движении воды перпендикулярно волокнам.

Пока нет единого мнения о зависимости значений МД, АД и ПД от уровней их измерения в СМ у детей. Было показано, что на протяжении СМ значения МД были одинаковыми [21, 22]. Однако выявлено, что значения МД в шейной и верхнегрудной части СМ были ниже, чем в дистальных отделах СМ [23]. При этом показано постепенное снижение значений ФА, АД, МД в шейном отделе позвоночника в направлении от C1 до Th1, в то время как значения ПД оставались относительно постоянными [17]. В нашем обследовании были выявлены более высокие значения МД, АД в нижних частях СМ, тогда как значения ПД были более низкими в шейной части и более высокими в дистальном отделе СМ.

Заключение

Установлены показатели диффузии ФА, МД, АД, ПД СМ условно здоровых детей в возрасте 13–18 лет и выявлены небольшие различия между отделами СМ. Полученные данные могут быть использованы как референтные значения для оценки состояния СМ при различных формах патологии (травмах, демиелинизирующих и опухолевых болезнях) у детей соответствующей возрастной группы.

Литература

(п.п. 1–3; 5; 6; 9–23 см. References)

- Дмитренко Д.М., Ахадов Т.А., Мещеряков С.В., Мельников И.А., Божко О.В., Семенова Ж.Б. и др. Диффузионно-тензорные изображения при травме шейного отдела позвоночника у детей. *Детская хирургия*. 2022; 26(2): 74–81. <https://doi.org/10.55308/1560-9510-2022-26-2-74-81> <https://elibrary.ru/wqzcxk>
- Божко О.В., Ахадов Т.А. Диффузионно-взвешенные и диффузионно-тензорные изображения у детей при позвоночно-спинномозговой травме: обзор. *Лучевая диагностика и терапия*. 2023; 14(1): 9–16. <https://doi.org/10.22328/2079-5343-2023-14-1-9-16>
- Левашкина И.М., Серебрякова С.В., Ефимцев А.Ю. Диффузионно-тензорная МРТ – современный метод оценки микроструктурных изменений вещества головного мозга (обзор литературы). *Вестник Санкт-Петербургского университета. Медицина*. 2016; (4): 39–54. <https://doi.org/10.21638/11701/spbu11.2016.404> <https://elibrary.ru/ygsgjv>

References

1. Bozzo A., Marcoux J., Radhakrishna M., Pelletier J., Goulet B. The role of magnetic resonance imaging in the management of acute spinal cord injury. *J. Neurotrauma*. 2011; 28(8): 1401–11. <https://doi.org/10.1089/neu.2009.1236>
2. Barry R.L., Vannesjo S.J., By S., Gore J.C., Smith S.A. Spinal cord MRI at 7T. *Neuroimage*. 2018; 168: 437–51. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2017.07.003>
3. Ruiz Santiago F., Láinez Ramos-Bossini A.J., Wang Y.X.J., Martínez Barbero J.P., García Espinosa J., Martínez Martínez A. The value of magnetic resonance imaging and computed tomography in the study of spinal disorders. *Quant. Imaging Med. Surg.* 2022; 12(7): 3947–86. <https://doi.org/10.21037/qims-2022-04>
4. Dmitrenko D.M., Akhadov T.A., Meshcheryakov S.V., Melnikov I.A., Bozhko O.V., Semenova Zh.B., et al. Diffusion tensor imaging for cervical spine trauma in children. *Detskaya khirurgiya*. 2022; 26(2): 74–81. <https://doi.org/10.55308/1560-9510-2022-26-2-74-81> <https://elibrary.ru/wqzcck> (in Russian)
5. Sasiadek M.J., Szewczyk P., Bładowska J. Application of diffusion tensor imaging (DTI) in pathological changes of the spinal cord. *Med. Sci. Monit.* 2012; 18(6): RA73–9. <https://doi.org/10.12659/msm.882891>
6. Trolle C., Goldberg E., Linnman C. Spinal cord atrophy after spinal cord injury - A systematic review and meta-analysis. *Neuroimage Clin.* 2023; 38: 103372. <https://doi.org/10.1016/j.nicl.2023.103372>
7. Bozhko O.V., Akhadov T.A. Diffusion-weighted and diffusion tensor imaging in children with spinal cord injury: a review. *Luchevaya diagnostika i terapiya*. 2023; 14(1): 9–16. <https://doi.org/10.22328/2079-5343-2023-14-1-9-16> (in Russian)
8. Levashkina I.M., Serebryakova S.V., Efimtsev A.Yu. Diffusion tensor MRI is a modern method for assessing microstructural changes in the brain (literature review). *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Meditsina*. 2016; (4): 39–54. <https://doi.org/10.21638/11701/spbu11.2016.404> <https://elibrary.ru/ygsgjv> (in Russian)
9. Martin A.R., Aleksanderek I., Cohen-Adad J., Tarmohamed Z., Tetreault L., Smith N., et al. Translating state-of-the-art spinal cord MRI techniques to clinical use: A systematic review of clinical studies utilizing DTI, MT, MWF, MRS, and fMRI. *Neuroimage Clin.* 2015; 10: 192–238. <https://doi.org/10.1016/j.nicl.2015.11.019>
10. Figley C.R., Stroman P.W. Investigation of human cervical and upper thoracic spinal cord motion: implications for imaging spinal cord structure and function. *Magn. Reson. Med.* 2007; 58(1): 185–9. <https://doi.org/10.1002/mrm.21260>
11. Kharbada H.S., Alsop D.C., Anderson A.W., Filardo G., Hackney D.B. Effects of cord motion on diffusion imaging of the spinal cord. *Magn. Reson. Med.* 2006; 56(2): 334–9. <https://doi.org/10.1002/mrm.20959>
12. Summers P., Staempfli P., Jaermann T., Kwiecinski S., Kollias S. A preliminary study of the effects of trigger timing on diffusion tensor imaging of the human spinal cord. *AJNR Am. J. Neuroradiol.* 2006; 27(9): 1952–61.
13. 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; 22(2): 174–81. <https://doi.org/10.1002/nbm.1298>
14. 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; 145(Pt. A): 24–43. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2016.10.009>
15. Winston G.P. The physical and biological basis of quantitative parameters derived from diffusion MRI. *Quant. Imaging Med. Surg.* 2012; 2(4): 254–65. <https://doi.org/10.3978/j.issn.2223-4292.2012.12.05>
16. Saksena S., Middleton D.M., Krisa L., Shah P., Faro S.H., Sinko R., et al. Diffusion tensor imaging of the normal cervical and thoracic pediatric spinal cord. *AJNR Am. J. Neuroradiol.* 2016; 37(11): 2150–7. <https://doi.org/10.3174/ajnr.A4883>
17. Barakat N., Mohamed F.B., Hunter L.N., Shah P., Faro S.H., Samdani A.F., et al. Diffusion tensor imaging of the normal pediatric spinal cord using an inner field of view echo-planar imaging sequence. *AJNR Am. J. Neuroradiol.* 2012; 33(6): 1127–33. <https://doi.org/10.3174/ajnr.A2924>
18. Alizadeh M., Fisher J., Saksena S., Sultan Y., Conklin C.J., Middleton D.M., et al. Age related diffusion and tractography changes in typically developing pediatric cervical and thoracic spinal cord. *Neuroimage Clin.* 2018; 18: 784–92. <https://doi.org/10.1016/j.nicl.2018.03.014>
19. Campbell W.W., DeJong R.N. The spinal cord level. In: *DeJong's the Neurologic Examination*. 6th ed. Philadelphia: Lippincott Williams Wilkins; 2005: 314–24.
20. Goto N., Otsuka N. Development and anatomy of the spinal cord. *Neuropathology*. 1997; 17(1): 25–31. <https://doi.org/10.1111/j.1440-1789.1997.tb00007.x>
21. Mossa-Basha M., Peterson D.J., Hippe D.S., Vranic J.E., Hofstetter C., Reyes M., et al. Segmented quantitative diffusion tensor imaging evaluation of acute traumatic cervical spinal cord injury. *Br. J. Radiol.* 2021; 94(1118): 20201000. <https://doi.org/10.1259/bjr.20201000>
22. Shahrampour S., De Leener B., Alizadeh M., Middleton D., Krisa L., Flanders A.E., et al. Atlas-based quantification of DTI measures in a typically developing pediatric spinal cord. *AJNR Am. J. Neuroradiol.* 2021; 42(9): 1727–34. <https://doi.org/10.3174/ajnr.A7221>
23. Bosma R.L., Stroman P.W. Characterization of DTI indices in the cervical, thoracic, and lumbar spinal cord in healthy humans. *Radiol. Res. Pract.* 2012; 2012: 143705. <https://doi.org/10.1155/2012/143705>

Сведения об авторах:

Божко Ольга Васильевна, канд. мед. наук, вед. науч. сотр. отдела лучевых методов диагностики, ГБУЗ «НИИ НДХиТ» ДЗ г. Москвы, bozhko_olga@mail.ru; **Ахадов Талибджон Абдуллаевич**, доктор мед. наук, проф., руководитель отдела лучевых методов диагностики, ГБУЗ «НИИ НДХиТ» ДЗ г. Москвы, akhadov@mail.ru; **Воронкова Елена Валерьевна**, науч. сотр. отд-ния лучевой диагностики ГБУЗ «НИИ НДХиТ» ДЗ г. Москвы, elena_voronkova13@mail.ru; **Кобзева Анна Александровна**, врач-рентгенолог отдела лучевых методов диагностики ГБУЗ «НИИ НДХиТ» ДЗ г. Москвы, kobzeva3@zdrav.mos.ru; **Мельников Илья Андреевич**, канд. мед. наук, зав. отд-нием КТ и МРТ отдела лучевых методов диагностики, ГБУЗ «НИИ НДХиТ» ДЗ г. Москвы, ilyamed@mail.ru