

ДИФФУЗНО-ВЗВЕШЕННЫЕ ИЗОБРАЖЕНИЯ И ДИФФУЗНО-ТЕНЗОРНАЯ ТРАКТОГРАФИЯ СПИННОГО МОЗГА У ДЕТЕЙ: ВЗАИМОСВЯЗЬ МЕЖДУ УРОВНЕМ ФРАКЦИОННОЙ АНИЗОТРОПИИ И КЛИНИЧЕСКОЙ КАРТИНОЙ ПОРАЖЕНИЯ СПИННОГО МОЗГА

Сысоев К.В.¹, Костицына Е.А.², Назинкина Ю.В.², Ефимцев А.Ю.¹,
Кулаева А.А.¹, Трофимова Т.Н.²

1 – Национальный медицинский исследовательский центр им. В.А. Алмазова. г. Санкт-Петербург, Россия.

2 – ФГБУН Институт мозга человека им. Н.П. Бехтерева РАН. г. Санкт-Петербург, Россия.

Цель исследования. Выявить потенциальную связь показателей фракционной анизотропии (ФА) при проведении МРТ в режиме диффузионно-взвешенных изображений (ДВИ) и диффузно-тензорная трактография (ДТТ) с клинической картиной поражения спинного мозга при различных патологиях спинного мозга у детей.

Материалы и методы. Обследовано 68 пациентов детского возраста (в возрасте от 2 месяцев до 18 лет) с различными аномалиями спинного мозга. При неврологическом осмотре оценивали степень (парез/паралич) и характер (вялый/спастический) двигательного дефицита в конечностях. Стандартная МРТ спинного мозга была дополнена режимом ДВИ и ДТТ. Для выявления статистически значимых корреляций были сопоставлены клинические и МРТ-данные.

Результаты. Было обнаружено, что снижение значений ФА на уровне каудальных отделов спинного мозга менее 0,3 было связано с наличием вялых параличей нижних конечностей, независимо от возраста ребенка ($P < 0,00001$). При сирингомиелии или диастематомиелии снижение значений ФА не соответствовало выраженности клинических симптомов.

Обсуждение. В норме значения ФА различаются на разных уровнях спинного мозга. Значения ФА каудальных отделов спинного мозга на 50% ниже, чем на ростральных уровнях, и обычно не превышает 0,4. В нашем исследовании при патологии каудальных отделов спинного мозга нарушение сегментарная функция наблюдалось при снижении уровня ФА менее 0,3, при этом сохранялось построение трактов в режиме ДТТ.

Заключение. Анализ значений ФА спинного мозга при различных патологиях может предоставить дополнительную информацию о степени тяжести его повреждения и прогнозе заболевания.

Ключевые слова: нейровизуализация, диффузно-взвешенные изображения, диффузионно-тензорная трактография, спинной мозг, спинальный дизрафизм.

Контактный автор: Кулаева А.А., e.mail: kulaevarina@yandex.ru

Для цитирования: Сысоев К.В., Костицына Е.А., Назинкина Ю.В., Ефимцев А.Ю., Кулаева А.А., Трофимова Т.Н. Диффузно-взвешенные изображения и диффузно-тензорная трактография спинного мозга у детей: взаимосвязь между уровнем фракционной анизотропии и клинической картиной поражения спинного мозга. REJR 2025; 15(3):197-210. DOI: 10.21569/2222-7415-2025-15-3-197-210.

Статья получена: 15.09.25

Статья принята: 30.10.25

DIFFUSION-WEIGHTED IMAGES AND DIFFUSION TENSOR TRACTOGRAPHY OF THE SPINAL CORD IN CHILDREN: THE RELATIONSHIP BETWEEN THE LEVEL OF FRACTIONAL ANISOTROPY AND THE CLINICAL PICTURE OF SPINAL CORD INJURY

Sysoev K.V.¹, Kostitsyna E.A.¹, Nazinkina Yu.V.¹, Efimtcev A. Yu.¹,
Kulaeva A.A.¹, Trofimova T.N.²

1 – Almazov National Medical Research Centre. Saint Petersburg, Russia.

2 – Institute of the Human Brain, Russian Academy of Sciences. Saint Petersburg, Russia.

Purpose. To identify the potential relationship of fractional anisotropy (FA) indices during MRI in the mode of diffusion-weighted images (DWI) and diffusion tensor tractography (DTT) with the clinical picture of spinal cord damage in various pathologies of the spinal cord in children.

Materials and methods. A total of 68 consecutive pediatric patients (2 months – 18 years old) with different spinal cord abnormalities underwent standard spinal cord MRI supplemented by DTI and Tractography. Neurological examination assessed the degree (paresis/paralysis) and characteristics (flaccid/spastic) of motor deficit. Clinical and MRI data were compared in order to identify statistically significant correlations.

Results. It was found that a decrease in FA values at the level of the caudal spinal cord of less than 0.3 was associated with the presence of flaccid paralysis of the lower extremities, regardless of the child's age ($P < 0.00001$). In syringomyelia or diastomatomyelia, the decrease in FA values did not correspond to the severity of clinical symptoms.

Discussion. FA values vary at different levels of the spinal cord. The FA values of the caudal spinal cord are 50% lower than at the rostral levels, and usually do not exceed 0.4. In our study, in the pathology of the caudal spinal cord, segmental dysfunction was observed with a decrease in the FA level of less than 0.3, while maintaining the construction of tracts in the DTT mode.

Conclusion. Analysis of spinal cord FA values in various pathologies can provide additional information about the severity of its damage and the prognosis of the disease.

Keywords: Neuroimaging, Diffusion Tensor Imaging, Diffusion Tensor Tractography, Spinal Cord, Spinal Dysraphism.

Corresponding author: Kulaeva A.A., e-mail: kulaevarina@yandex.ru

For citation: Sysoev K.V., Kostitsyna E.A., Nazinkina Yu.V., Efimtcev A. Yu., Kulaeva A.A., Trofimova T.N. Diffusion-weighted images and diffusion tensor tractography of the spinal cord in children: the relationship between the level of fractional anisotropy and the clinical picture of spinal cord injury. REJR 2025; 15(3):197-210. DOI: 10.21569/2222-7415-2025-15-3-197-210.

Received: 15.09.25

Accepted: 30.10.25

Режим диффузно-взвешенных МР-изображений (ДВИ) и диффузно-тензорная трактография (ДТТ) предоставляют дополнительные возможности для выявления поражения спинного мозга различной этиологии. При таких патологических процессах, как отёк, воспаление, нейродегенеративные заболевания, травмы или интрамедуллярные опухоли происходят изменения линейной организации проводящих путей белого вещества. ДВИ и ДТТ регистрируют эти изменения, позволяя изучать изменения в структуре вещества спинного мозга *in vivo* [1-7]. Также предполагается, что ДВИ и ДТТ могут быть использованы для оценки возрастных изменений и степени миелинизации спинного мозга у детей [8,9].

Одним из основных коэффициентов, используемых при оценке ДВИ, является фракционная анизотропия (ФА), характеризующая степень однонаправленности движения молекул воды в нервной ткани. Она варьирует от нуля, когда диффузия разнонаправленна, до единицы, когда диффузия происходит вдоль одной оси [10]. Хотя счита-

ется, что минимальное значение ФА, необходимое для построения трактов белого вещества, составляет 0,2, уровень ФА, обеспечивающий сохранность функций спинного мозга при различных патологиях, до сих пор не выяснен [11].

Цель исследования.

Выявить потенциальную связь между значениями ФА и клинической картиной поражения спинного мозга у детей с различными патологиями спинного мозга.

Материалы и методы.

Проведен ретроспективный анализ результатов обследования 68 пациентов детского возраста с широким спектром патологии спинного мозга: мальформации, травма, опухоли и др. При неврологическом осмотре определяли степень (парез/паралич) и характеристики (вялый/спастический) двигательного дефицита. Перед проведением обследования от всех пациентов или их опекунов было получено письменное согласие. Пациентам младше 5 лет МРТ проводилась под седацией и анальгезией. Протокол исследования МРТ был одобрен этическим советом учреждения. Обследование проводилось на

Таблица №1. Пол, возраст, диагноз, клинические проявления патологии пациента, значение ФА уровня патологии.

<i>N</i>	<i>Пол</i>	<i>Возраст (мес.)</i>	<i>Диагноз</i>	<i>Клинические проявления</i>	<i>Уровень ФА</i>
<i>Шейный отдел спинного мозга</i>					
1	м	24	Дорсальная липома С6-Т1	Радикулярная боль	> 0.4 на уровне опухоли
2	м	108	Пилоцитарная астроцитома С6-Т2	Нет	
3	м	2	Ограниченный дорсальный миелозис + С3-С4 сирингомиелия	Нет	0.3 – 0.4 на уровне сирингомиелии
4	ж	108	Мальформация Киари I + С3-С6 Сирингомиелия	Нет	
5	м	120	Мальформация Киари I + С6-С7 Сирингомиелия	Нет	
6	ж	60	Ахондроплазия, миелопатия С1-С3	Тетрапарез	0.3 – 0.4 на уровне миелопатии
7	ж	12	Анапластическая астроцитома С7-Т4	Тетрапарез	< 0.2 на уровне опухоли
<i>Грудной отдел спинного мозга</i>					
8	ж	168	Спондилоэпифизарная дисплазия	Боль в спине	> 0.5 на уровне исследования

9	ж	108	Диффузный отек спинного мозга	Вялый тетрапарез	0.3 – 0.4 на уровне отека спинного мозга
10	м	204	Анапластическая эпендимомы Т7-Т9	Вялый парапарез	0.3 – 0.4 на уровне опухоли
11	ж	84	Травма спинного мозга на уровне С6-Т2	Спаستическая параплегия	<0.2 на уровне повреждения спинного мозга, и 0.3 – 0.4 каудальнее уровня повреждения спинного мозга
12	м	180	Травма спинного мозга на уровне Т5-Т7	Спастический парапарез	0.3 – 0.4 на уровне повреждения спинного мозга
13	ж	17	Атрофия спинного мозга на уровне Т9-Т10	Спастический парапарез	<0.2 на уровне атрофии спинного мозга, > 0.3 каудальнее уровня атрофии спинного мозга
14	ж	12	Миеломенингоцеле Т12-Л5	Вялая параплегия	<0.2 на уровне миеломенингоцеле, и > 0.4 на несколько сегментов над уровнем миеломенингоцеле
15	м	132	Миеломенингоцеле Т12-Л5	Вялая параплегия	
16	м	48	Миеломенингоцеле Т11-Л4	Вялая параплегия	
17	м	24	Миеломенингоцеле L2-L5+ холокорд-сирингомиелия	Вялая параплегия	0.2 – 0.3 на уровне сирингомиелии
18	м	24	Миеломенингоцеле L2-L5 холокорд-сирингомиелия	Вялая параплегия	
19	м	36	Миеломенингоцеле L5-S3 холокорд-сирингомиелия	Вялая параплегия	
20	ж	36	Миеломенингоцеле Т10-Т12	Спастическая параплегия	<0.2 на уровне миеломенингоцеле, 0.4 – 0.5 на несколько сегментов над уровнем миеломенингоцеле и > 0.3 каудальнее уровня миеломенингоцеле
21	ж	96	Диастематомиелия (Тип I) + Гемикорд-липома Т3-Т11	Абдоминальная боль	0.3 на уровне липомы, и 0.3 – 0.4 на уровне диастематомиелии каудальнее липомы
<i>Каудальные отделы спинного мозга</i>					
22	ж	6	Переходная липома L1-S1	Нет	От 0.3 на несколько сегментов над уровнем липомы до 0.6 на уровне липомы
23	м	3	Переходная липома L3-S1	Нет	> 0.4
24	ж	3	Дорсальная липома L1-L3	Нет	
25	м	204	Тератома эпиконуса Т12-Л1	Спастическая параплегия	0.2 на уровне тератомы, > 0.3 каудальнее уровня тератомы
26	ж	3	Миеломенингоцеле L3-L5	Вялая параплегия	< 0.3 на уровне миеломенингоцеле
27	м	12	Миеломенингоцеле L3-L5	Вялая параплегия	

28	м	12	Миеломенингоцеле L3-L5	Вялая параплегия	
29	м	24	Миеломенингоцеле L3-L5	Вялая параплегия	0.3 на уровне миеломенингоцеле
30	м	48	Миеломенингоцеле L3-L5	Вялая параплегия	< 0.3 на уровне миеломенингоцеле
31	м	48	Миеломенингоцеле L4-L5	Вялая параплегия	
32	м	72	Миеломенингоцеле L3-L5	Вялая параплегия	
33	ж	48	Миеломенингоцеле L4-L5	Вялый парапарез	0.3 на уровне миеломенингоцеле
34	ж	72	Миеломенингоцеле L4-L5	Вялый парапарез	
35	м	36	Миеломенингоцеле L5-S1	Вялый парапарез	
36	м	24	Миеломенингоцеле L5-S1	Вялый парапарез	0.3–0.4 на уровне миеломенингоцеле
37	ж	132	Миеломенингоцеле L4-L5	Вялый парапарез	> 0.4 на уровне миеломенингоцеле
38	м	120	Липомиеломенингоцеле L4-L5	Вялый парапарез	> 0.3 на уровне липомиеломенингоцеле
39	ж	12	Липомиеломенингоцеле L3-L4	Вялый парапарез	0.3 – 0.4 на уровне липомиеломенингоцеле
40	ж	72	Миеломенингоцеле L5-S1	Вялый парапарез	0.4 на уровне миеломенингоцеле
41	м	48	Липомиеломенингоцеле L5-S1	Вялый парапарез	0.3 на уровне липомиеломенингоцеле
42	ж	108	Миеломенингоцеле S1-S2	Недержание	0.4 на уровне каудальных отделов спинного мозга
43	м	120	Миеломенингоцеле S1-S2	Недержание	0.3 – 0.4 на уровне каудальных отделов спинного мозга
44	м	168	Миеломенингоцеле S1-S2	Недержание	0,6 на уровне каудальных отделов спинного мозга
45	м	84	Липомиеломенингоцеле L5-S1	Недержание	0.3 – 0.4 на уровне каудальных отделов спинного мозга
46	ж	108	Менингоградикулоцеле S1-S2	Недержание	0.4 на уровне каудальных отделов спинного мозга
47	ж	132	Липомиеломенингоцеле L5-S1	Недержание	0.3 на уровне каудальных отделов спинного мозга
48	ж	156	Липомиеломенингоцеле S1-S2	Недержание	0.4 на уровне каудальных отделов спинного мозга

49	ж	204	Менингоградикулоцеле L5-S1	Недержание	0.3 каудально
50	м	24	Липома терминальной нити спинного мозга	Нарушение мочеиспускания	0.4 на уровне каудальных отделов спинного мозга
51	ж	36	Дорсальная липома L4-L5	Нарушение мочеиспускания	<u>0.4 – 0.5</u> на уровне каудальных отделов спинного мозга
52	ж	60	Липома терминальной нити спинного мозга	Деформация стоп	0.4 на уровне каудальных отделов спинного мозга
53	ж	96	Липома терминальной нити спинного мозга	Нарушение мочеиспускания	Увеличена с 0.3 до 0.5 на уровне каудальных отделов спинного мозга
54	м	144	Дорсальная липома L2-L3	Деформация стоп	0.4 – 0.5 на уровне каудальных отделов спинного мозга
55	ж	24	Диастематомиелия (Type I) L1-L2	Деформация стоп	0.2 – 0.3 на уровне диастематомиелии
56	ж	48	Диастематомиелия (Type I) T12-L1	Деформация стоп	
57	ж	96	Диастематомиелия (Type I) L3-L4	Деформация стоп	0.3 на уровне диастематомиелии
58	ж	156	Диастематомиелия (Type II) T12-L2	Боль в спине	0.4 на уровне диастематомиелии
59	ж	204	Диастематомиелия (Type II) L1-L3	Боль в ногах	0.3 – 0.4 на уровне диастематомиелии
60	ж	12	Диастематомиелия (Type I) L1-L5	Вялый парез (S>D)	Снижена с 0.4 до 0.2 на уровне диастематомиелии
61	м	24	Диастематомиелия (Type I) L1-L2	Вялый парез (D>S)	0.2 – 0.3 на уровне диастематомиелии
62	ж	12	Гемимиеломенингоцеле L2-L3	Вялая плегия левой конечности	Тракты не визуализировались ниже уровня разделения спинного мозга, над уровнем разделения ФА> 0.3
63	ж	36	Детский церебральный паралич	Спаستичность	<0.3 на уровне конуса спинного мозга
64	ж	108	Детский церебральный паралич	Спастичность	0.4 на уровне конуса спинного мозга
65	м	108	L2 спондилит	Боль в спине	0.3 на уровне конуса спинного мозга
66	м	132	Киста Гарлова	Боль в спине	0.35 на уровне конуса спинного мозга
67	ж	132	L5-S1 грыжа диска	Боль в спине	0.35 на уровне конуса спинного мозга
68	м	216	Параартикулярная киста L4-L5	Боль в спине	0.4 на уровне конуса спинного мозга

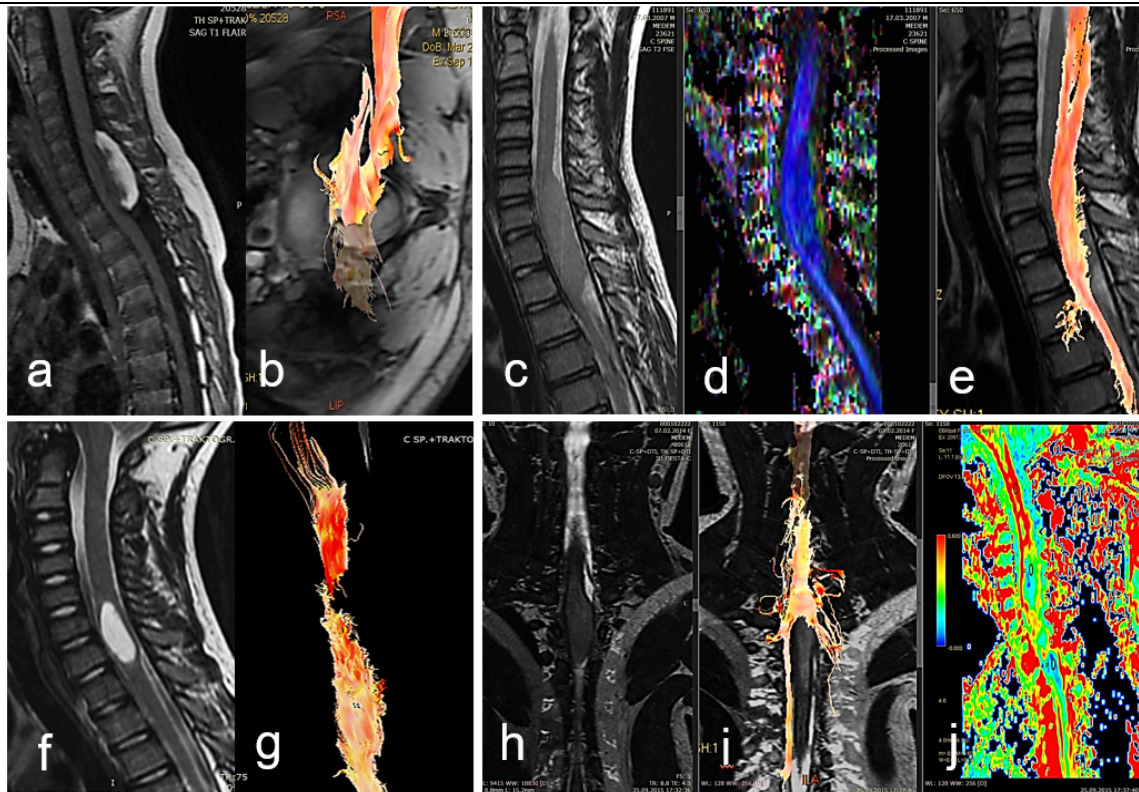


Рис. 1 (Fig. 1)

Рис. 1. МРТ шейного отдела позвоночника.

а, б – Мальчик, 2 года, дорсальная липома спинного мозга (пациент 1 в табл. №1). а – сагиттальная плоскость, T1-взвешенное изображение шейного отдела спинного мозга; б – диффузионно-тензорная трактография; интактные тракты белого вещества проходят за пределами липомы.

с - е – Мальчик, 9 лет, диффузная астроцитомы спинного мозга (пациент 2 в табл. №1). с – сагиттальная плоскость, T2-ВИ шейного отдела спинного мозга; d – диффузно-взвешенное изображение; e – трактография; сохранные тракты белого вещества, проходящие через опухоль.

f, g – Мальчик, 12 лет, мальформация Киари I типа и сирингомиелия (пациент 5 в табл. №1). f – сагиттальная плоскость, T2-ВИ шейного отдела спинного мозга; g – диффузионно-тензорная трактография; изменение положения и частичное прерывание трактов белого вещества на уровне сирингомиелии.

h - j – Девочка, 1 год, анапластическая астроцитомы спинного мозга (пациентка 7 в табл. №1). h – корональная плоскость, T2-ВИ шейного отдела спинного мозга; j – диффузно-взвешенное изображение; i – трактография; изменение положения и частичное прерывание трактов белого вещества на уровне опухоли.

Fig. 1. MRI, cervical spinal cord.

a, b – 2-year-old boy with dorsal spinal cord lipoma (patient 1 in Table 1), a – sagittal T1-weighted image of the cervical spine; b – diffusion tensor tractography shows intact white-matter tracts pass outside the tumor.

c - e – 9-year-old boy with diffuse spinal cord astrocytoma (patient 2 in Table 1); c – sagittal T2-weighted image of the cervical spine; d – diffusion-weighted image; e – tractography; intact white-matter tracts pass through the tumor.

f-g – 12-year-old boy with Chiari I malformation and cervical syringomyelia (patient 5 in Table1); f – sagittal T2-weighted image of the cervical spine; g – diffusion tensor tractography; displacement and partial interruption of white-matter tracts on the level of the syringomyelia.

h - j – 1-year-old girl with spinal cord anaplastic astrocytoma (patient 7 in Table 1), h – coronal T2-weighted image of the cervical spine, j – diffusion-weighted image; i – tractography; displacement and partial interruption of tracts on the level of the tumor).

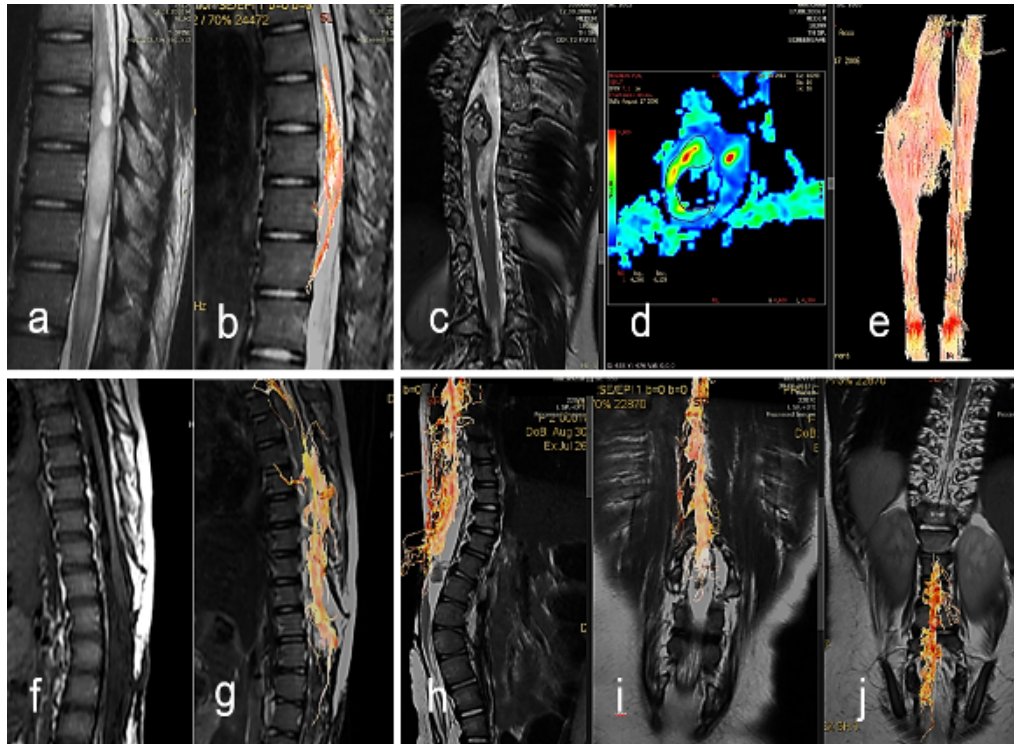


Рис. 2 (Fig. 2)

Рис. 2. МРТ грудного отдела позвоночника.

а, b – Мальчик, 17 лет, анапластическая эпендимома спинного мозга (пациент 10 в табл. №1). а – сагиттальная плоскость, T2-ВИ грудного отдела спинного мозга; b – диффузионно-тензорная трактография; истощение и частичное прерывание трактов белого вещества на уровне опухоли.

с - е – Девочка, 8 лет, диастематомия (Тип 1) на уровне Th3-Th11 позвонков, интрамедуллярная гемикорд-липому (пациент 21 в табл. №1). с – корональная плоскость, T2-ВИ е грудного отдела спинного мозга; d – аксиальная плоскость, диффузионно-взвешенное изображение; e – диффузионно-тензорная трактография; истончение, прерывание трактов белого вещества спинного мозга, тракты правой половины спинного мозга огибают липому снаружи.

f, g – Мальчик, 4 года, миеломенингоцеле, послеоперационная МРТ (пациент 16 в табл. №1). f – сагиттальная плоскость, T1-ВИ грудного отдела спинного мозга; g – диффузионно-тензорная трактография; прерывание трактов на уровне миеломенингоцеле.

h - j – Девочка, 3 года, миеломенингоцеле на уровне грудного отдела позвоночника, послеоперационная МРТ (пациент 20 в табл. №1). h – сагиттальная плоскость, диффузионно-тензорная трактография, i – корональная плоскость, диффузионно-тензорная трактография; прерывание трактов белого вещества спинного мозга на уровне миеломенингоцеле; j –диффузионно-тензорная трактография, восстановление и реконструкция трактов, расположенных каудальнее дефекта.

Fig. 2. MRI, thoracic spinal cord.

a, b – 17-year-old boy with spinal cord anaplastic ependymoma (patient 10 in Table 1); a – sagittal T2-weighted image of the thoracic spine; b – diffusion tensor tractography shows depletion and partial interruption of white-matter tracts on the level of the tumor.

c - e – 8-year-old girl with SCM I at the level of Th3-Th11, right hemichord intramedullary lipoma (patient 21 in Table 1); c – coronal T2-weighted image of the thoracic spine; d – axial diffusion-weighted image; e – diffusion tensor tractography; the tracts of the right hemichord bend around the lipoma from the outside, thinning and partial interruption of tracts occurs.

f, g – 4-year-old boy with thoracic MMC, postoperative MRI (patient 16 in Table 1); f – sagittal T1-weighted image of the thoracic spine; g – diffusion tensor tractography; the tracts were interrupted at the level of the MMC.

h - j – 3-year-old girl with thoracic MMC, postoperative MRI (patient 20 in Table 1); h – diffusion tensor tractography in the sagittal plane, i - diffusion tensor tractography in the coronal plane; interruption of tracts at the level of the MMC; j – diffusion tensor tractography, repair and reconstruction of tracts distal to the defect.

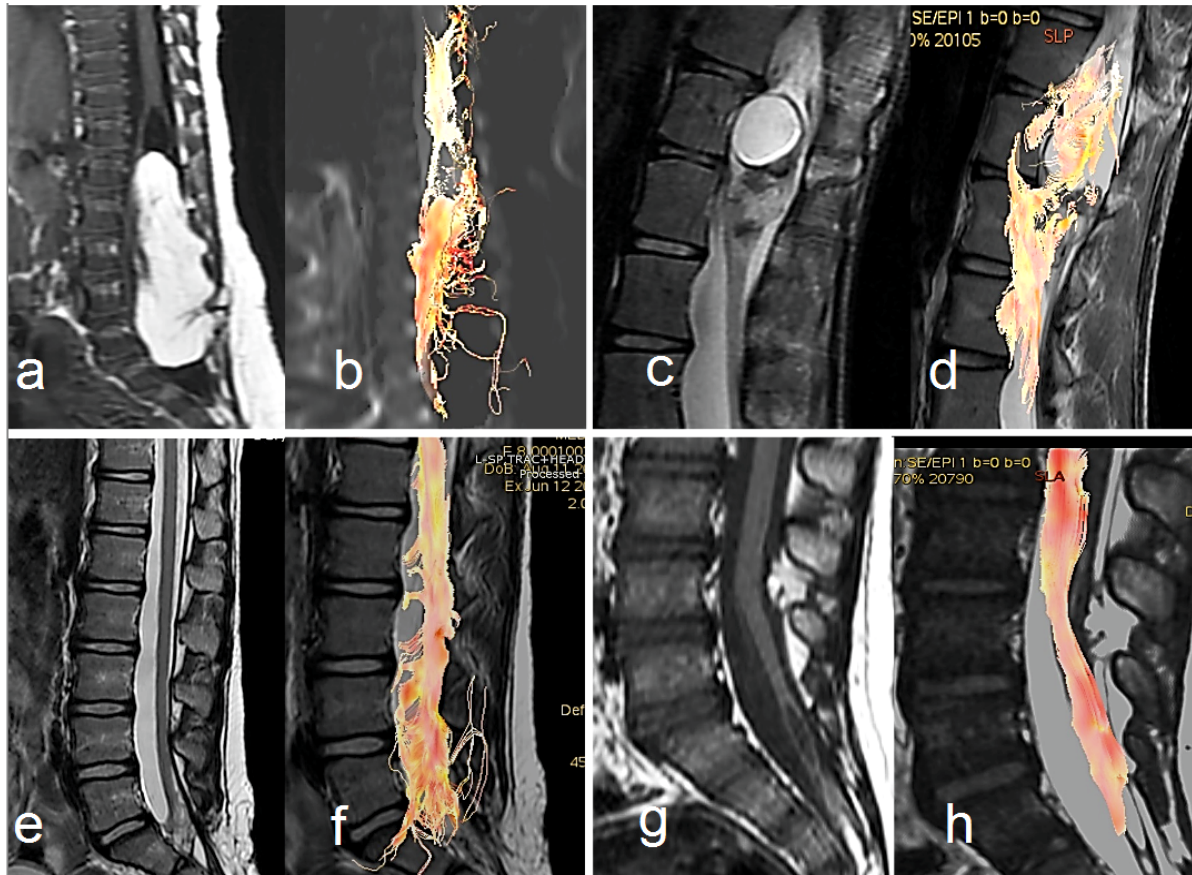


Рис. 3 (Fig. 3)

Рис. 3. МРТ пояснично-крестцового отдела позвоночника.

а, б – Девочка, 6 месяцев, переходная липома конуса спинного мозга, терминальная сирингомиелия (пациентка 22 в табл. №1). а – сагиттальная плоскость, T1-ВИ каудальных отделов спинного мозга; б – диффузионно-тензорная трактография; изменение положения, компрессию трактов белого вещества липомой, прерывание трактов на уровне сирингомиелии.

с, d – Мальчик, 17 лет, тератома эпиконуса спинного мозга (пациент 25 в табл. №1). с – сагиттальная плоскость, T2-ВИ каудальных отделов спинного мозга; d – диффузионно-тензорная трактография; прерывание трактов на уровне опухоли.

е, f – Девочка, 9 лет, миеломенингоцеле на уровне L5-S1, послеоперационная МРТ (пациентка 42 в табл. №1). е – сагиттальная плоскость, T2ВИ каудальных отделов спинного мозга; f – диффузионно-тензорная трактография; прерывание трактов на уровне L5-S1.

g, h – Девочка, 8 лет, липома терминальной нити спинного мозга (пациентка 53 в табл. №1). g – сагиттальная плоскость, T1-ВИ каудальных отделов спинного мозга; h – диффузионно-тензорная трактография; прерывание трактов белого вещества на уровне S1-S2 позвонков.

Fig. 3. MRI, lumbosacral spinal cord.

а, b – 6-month-old girl with spinal cord conus transitional lipoma, terminal syringomyelia (patient 22 in Table 1); a – sagittal T1-weighted image of the lumbar spine; b – diffusion tensor tractography; displacement, compression of the white-matter tracts by lipoma, interruption of tracts in the syringomyelia area.

с, d – 17-year-old boy with epiconus teratoma (patient 25 in Table 1); с – sagittal T2-weighted image of the lumbar spine; d – diffusion tensor tractography; interruption of tracts at the level of the tumor.

е, f – 9-year-old girl with MMC at the L5-S1 level, postoperative MRI (patient 42 in Table 1); е – sagittal T2-weighted image of the lumbar spine; f – diffusion tensor tractography; the tracts interruption at L5-S1 level.

g, h – 8-year-old girl with filar lipoma (patient 53 in Table 1); g – sagittal T1-weighted image of the lumbar spine; h – diffusion tensor tractography; interruption of white-matter tracts at S1-S2 level.

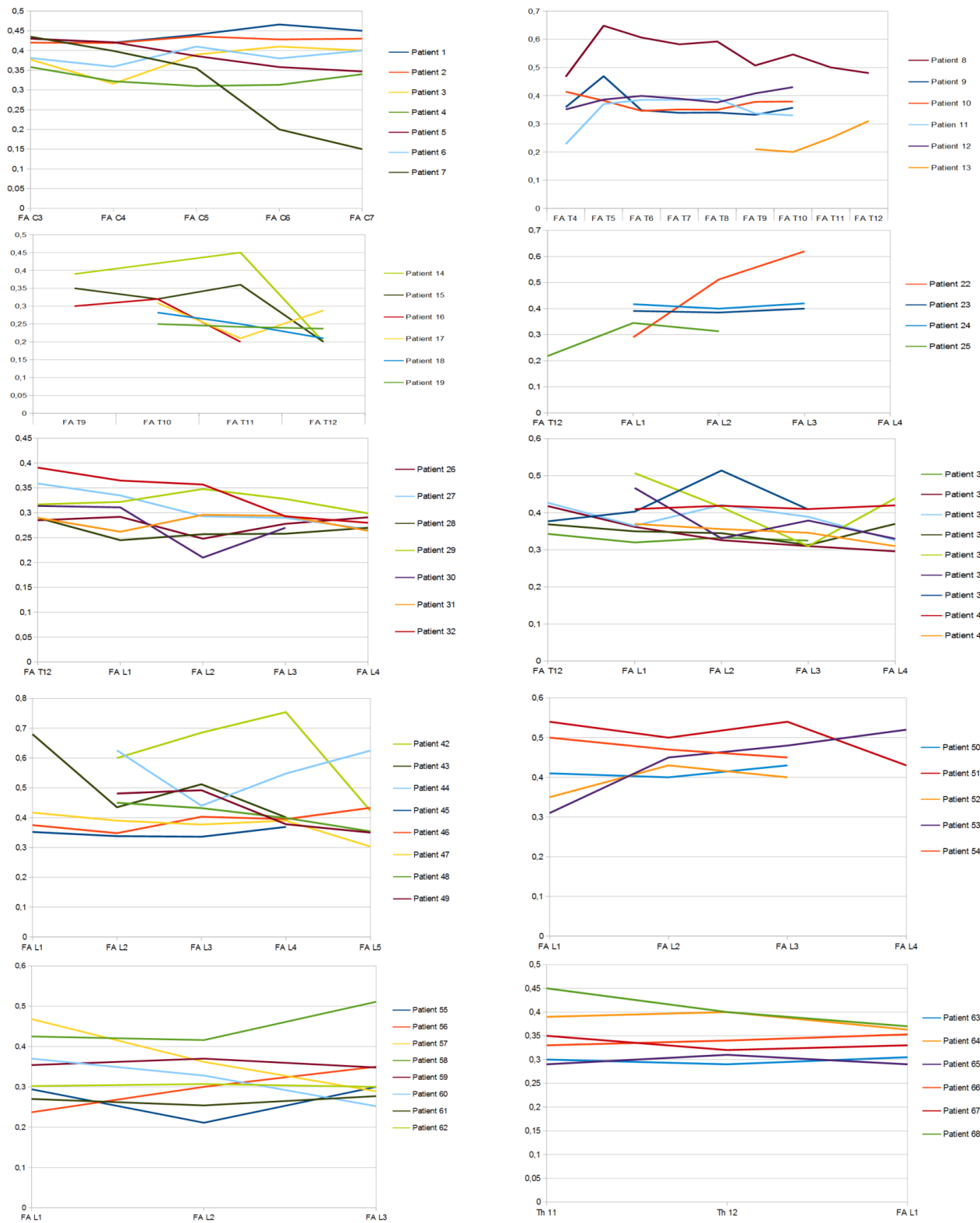


Рис. 4 (Fig. 4)

Рис. 4. Диаграммы, иллюстрирующие изменение значений ФА в зависимости от уровня спинного мозга для каждого пациента.

Fig. 4. Diagrams of changes of FA values at different levels of the spinal cord for each patient.

томографе с мощностью магнитного поля 3 Т (GE Signa). Применялась стандартная HD 8-канальная СТЛ-катушка, спин-эхо эхопланарная последовательность в 25 направлениях, весовой коэффициент диффузии 0 и 400, TR 2100 мс, TE 70 мс, размер вокселя 1x1x4 мм, толщина среза 4,0 мм, сагиттальная плоскость сбора данных. Постпроцессинговая обработка проводилась на станции GE Advanced Workstation 4.4. Анализировались карты ФИ, области интереса (ROI) располагались на нескольких уровнях, начиная от соседних неизмененных на T1- и T2-взвешенных изображениях сегментов спинного мозга в сагиттальной плоскости до области патологических изменений спинного мозга. Для выявления статистически значимых взаимосвязей проводилось сравнение клинических данных с показателями ФИ. Статистическая обработка данных проводилась с использованием критерия χ^2 Пирсона, значение $P < 0,05$ считалось статистически значимым.

Результаты.

Средний возраст пациентов на момент проведения исследования составил 6,5 лет (медиана по возрасту 5,5 года). Распределение по полу: 30 (44%) мальчиков, 38 (56%) девочек (табл. №1).

Пациенты с очевидными, ранее описанными в литературе факторами, вызывающими локальное снижение ФА без связи с клинической симптоматикой, такими как снижение плотности трактов, вследствие их разделения без повреждения при наличии кисты или диастемы (сирингомиелия, диастематомиелия), были исключены из дальнейшего исследования. У оставшихся 33 пациентов с различной степенью поражения спинного мозга изучалась связь между сохранностью сегментарной функции спинного мозга и значением ФА на данном уровне. Отмечено, что при значениях ФА ниже 0,3 сегментарная функция спинного мозга утрачивалась в 10 случаях, тогда как сохранялась у 2 пациентов независимо от возраста. При значениях ФА, равных или выше 0,3, сегментарная функция спинного мозга сохранялась в 20 случаях, тогда как утрата наблюдалась только у 1 пациента. Данная связь оказалась статистически значимой. ($\chi^2=21,2$, χ^2 with Yates correction=17,8, $P<0.00001$).

Обсуждение.

В норме значения ФА различаются на разных уровнях спинного мозга. Например, каудальные отделы спинного мозга более подвижны, поэтому значение ФА на этом уровне обычно на 50% ниже, чем на более

ростральных уровнях, и обычно не превышает 0,4 [12- 15]. Кроме того, возрастные особенности также влияют на значения ФА. У детей нормальные значения ФА ниже, чем у взрослых. В частности, на уровне шейного отдела спинного мозга у детей они варьируют от 0,6 в верхних отделах до 0,5 на уровне шейного утолщения. Аналогично на уровне грудного отдела спинного мозга ФА варьирует от 0,6 в среднегрудном отделе до 0,5 в нижнегрудном [16,17]. В целом у детей в возрасте от 6 до 11 лет значение ФА на уровне шейного и грудного отделов спинного мозга в норме составляет $0,42 \pm 0,097$, а у детей в возрасте от 12 до 16 лет – $0,49 \pm 0,116$ [6]. Полученные в нашем исследовании значения ФА спинного мозга вне зоны поражения соответствовали этим данным. У пациентов без патологии спинного мозга при назначении ДТТ в качестве дополнительного метода исследования (пациенты 63–68 в табл. №1 и рис. 4) ФА на уровне конуса спинного мозга превышала 0,3. Кроме того, нами отмечено патологическое увеличение ФА за счёт натяжения или компрессии спинного мозга, что также соответствует данным литературы и может быть связано со снижением мобильности и увеличением плотности проводящих путей спинного мозга [18,19].

Известно, что патологическое снижение ФА может быть вызвано отеком, кровоизлиянием, глиозом, демиелинизацией, Валлеровской дегенерацией, а также прерыванием проводящих путей белого вещества спинного мозга вследствие травмы или опухолевой инвазии [20- 25]. В нашем исследовании снижение индекса ФА в среднем на 0,1 наблюдалось при сирингомиелии, отеке, травматическом повреждении или диффузной опухоли спинного мозга, а также при расщеплении спинного мозга на фоне диастематомиелии, что также соответствует литературным данным [18]. Кроме того, были выявлены изменения ФА прилежащего спинного мозга при его повреждении на уровне грудного отдела позвоночника. В частности, у девочки с врожденной очаговой атрофией спинного мозга на уровне Th9-Th10 (возможно вследствие внутриутробного спинального инсульта) со спастическим парапарезом (пациентка 13, табл. №1 и рис. 4) наблюдался перерыв проводящих путей на уровне поражения спинного мозга и снижение ФА ниже 0,2 в области поражения и повышение более чем на 0,3 дистальнее поражения. У другой девочки (пациентка 20, табл. №1 и рис. 2 г) с ММЦ нижнегрудного отдела позвоночника и спастической параплегией наблюдался пере-

рыв проводящих путей на уровне ММЦ, индекс ФА над дефектом снизился с 0,6 до 0,4, и наблюдалась реконструкция проводящих путей дистальнее поражения, где ФА был менее 0,4. На уровне каудальных отделов спинного мозга у мальчика с интрамедуллярной тератомой эпиконуса спинного мозга и спастической параплегией (пациент 25 в табл. №1; рис. 3 б) ФА на уровне поражения составляла около 0,2, при этом тракты были частично прерваны. Таким образом, несмотря на поражение проксимальных трактов спинного мозга, сегментарная функция была сохранена при значениях ФА выше 0,3, а парез носил спастический характер.

Нами была выявлена корреляция между наличием клинических признаков сегментарных дисфункций каудального отдела спинного мозга и снижением уровня ФА на этом уровне. При повреждении каудального отдела спинного мозга со значениями ФА менее 0,3 сегментарная функция также терялась, однако тракты на ДТТ-трактографии могли быть сохранены. Таким образом, у детей с пороками развития каудальных отделов спинного мозга без грубой миелодисплазии (дорсальная липома, липома терминальной нити) и умеренно выраженной сегментарной дисфункцией каудальных отделов спинного мозга в виде парезов в нижних конечностях

индекс ФА варьировал в пределах от 0,3 до 0,4. У пациентов с грубой миелодисплазией (ММЦ, ЛММЦ) и клиническими симптомами сегментарной дисфункции (плегии) ФА не превышал 0,3 независимо от возраста ребенка. Выявленные клинические корреляции с пороговым значением индекса ФА, вероятно, позволяют уточнить прогноз течения заболевания и предоперационный прогноз в отношении обратимости симптомов у пациента.

Заключение.

В нашем исследовании индекс ФА отрицательно коррелировал с выраженностью неврологического дефицита. При снижении уровня ФА менее 0,3 достоверно ожидалось выпадение сегментарной функции спинного мозга независимо от возраста ребенка. Однако отмечено, что при сирингомиелии или диастематомиелии снижение значений ФА может не соответствовать выраженности клинической симптоматики.

Источник финансирования и конфликт интересов.

Авторы данной статьи подтвердили отсутствие финансовой поддержки исследования и конфликта интересов, о которых необходимо сообщить.

Список литературы:

1. Clark CA, Werring DJ, Miller DH. Diffusion imaging of the spinal cord in vivo: estimation of the principal diffusivities and application to multiple sclerosis. *Magn Reson Med*. 2000; 43(1):133-138. DOI: 10.1002/(sici)1522-2594(200001)43:1<133::aid-mrm16>3.0.co;2-x
2. Kozlowski P, Raj D, Liu J, Lam C, Yung AC, Tetzlaff W. Characterizing white matter damage in rat spinal cord with quantitative MRI and histology. *Journal of neurotrauma*. 2008; 25(6): 653-676. DOI: 10.1089/neu.2007.0462
3. Endo T, Suzuki S, Utsunomiya A, Uenohara H., Tominaga T. Prediction of neurological recovery using apparent diffusion coefficient in cases of incomplete spinal cord injury. *Neurosurgery*. 2011; 68(2): 329-336 DOI: 10.1227/NEU.0b013e3182031ce7
4. Toktas ZO, Tannkulu B, Koban O, Kilic T, Konya D. Diffusion tensor imaging of cervical spinal cord: A quantitative diagnostic tool in cervical spondylotic myelopathy. *Journal of craniovertebral junction & spine*. 2016; 7(1): 26-30. DOI: 10.4103/0974-8237.176617
5. Hsu Y, Chou MC, Yeh PS, Wu TC, Ko CC, Chen TY. Magnetic-Resonance Diffusion-Tensor Tractography in the Diagnosis of Tumefactive Spinal-Cord Lesions in Neuromyelitis Optica. *Diagnostics (Basel, Switzerland)*. 2020; 10(6): 401. DOI: 10.3390/diagnostics10060401
6. Тихова К.Е., Савелло В.Е., Мануковский В.А. Возможности магнитнорезонансной томографии в диагностике повреждений спинного мозга у пострадавших с травмой шейного отдела позвоночника. *REJR*. 2021; 11(3):151-161. DOI: 10.21569/2222-7415-2021-11-3-151-161.
7. Исаева Я.О., Коростышевская А.М., Савелов А.А., Ярных В.Л. Возможности количественных методов магнитно-резонансной томографии (МРТ) в оценке внутриутробной миелинизации головного мозга. *REJR*. 2020; 10(2):183-194. DOI:10.21569/2222-7415-2020-10-2-183-194.
8. Alizadeh M, Fisher J, Saksena S, Sultan Y, Conklin CJ, Middleton DM, Krisa L, Finsterbusch J, Flanders A E, Faro SH, Mulcahey MJ, Mohamed FB. Age related diffusion and tractography changes in typically developing pediatric cervical and thoracic spinal cord. *NeuroImage. Clinical*. 2018; 18: 784-792. DOI: 10.1016/j.nicl.2018.03.014
9. Antherieu P, Levy R, De Saint Denis T, Lohkamp L, Pateroster G, Di Rocco F, Boddaert N, Zerah M. Diffusion tensor imaging (DTI) and Tractography of the spinal cord in pediatric population with spinal lipomas: preliminary study. *Childs Nerv Syst*. 2019; 35(1): 129-137. DOI: 10.1007/s00381-018-3935-2
10. Fujiyoshi K, Konomi T, Yamada M, Hikishima K, Tsuji O, Komaki Y, Momoshima S, Toyama Y, Nakamura M, Okano H. Diffusion tensor imaging and tractography of the spinal cord: from experimental studies to clinical application. *Experimental neurology*. 2013; 242: 74-82. DOI:

- 10.1016/j.expneurol.2012.07.015
11. Melhem ER, Mori S, Mukundan G, Kraut MA, Pomper MG, van Zijl PC. Diffusion tensor MR imaging of the brain and white matter tractography. *AJR. American journal of roentgenology.* 2002; 178(1): 3-16. DOI: 10.2214/ajr.178.1.1780003
12. Onu M, Gervai P, Cohen-Adad J, Lawrence J, Kornelsen J, Tomanek B, Sbotto-Frankensteen UN. Human cervical spinal cord funiculi: investigation with magnetic resonance diffusion tensor imaging. *Journal of magnetic resonance imaging: JMRI.* 2010; 31(4): 829-837. DOI: 10.1002/jmri.22101
13. Tsuchiya K, Fujikawa A, Honya K, Nitatori T, Suzuki Y. Diffusion tensor tractography of the lower spinal cord. *Neuroradiology.* 2008; 50(3): 221-225. DOI: 10.1007/s00234-007-0335-9
14. Ellingson BM, Ulmer JL, Kurpad SN, Schmit BD. Diffusion tensor MR imaging of the neurologically intact human spinal cord. *AJNR. American journal of neuroradiology.* 2008; 29(7): 1279-1284. DOI: 10.3174/ajnr.A1064
15. Calabrese E, Adil SM, Cofer G, Perone CS, Cohen-Adad J, Lad SP, Johnson GA. Postmortem diffusion MRI of the entire human spinal cord at microscopic resolution. *NeuroImage. Clinical.* 2018; 18: 963-971. DOI: 10.1016/j.nicl.2018.03.029
16. Barakat N, Mohamed FB, Hunter LN, Shah P, Faro SH, Samdani AF, Finsterbusch J, Betz R, Gaughan J, Mulcahey MJ. Diffusion tensor imaging of the normal pediatric spinal cord using an inner field of view echo-planar imaging sequence. *AJNR. American journal of neuroradiology.* 2012; 33(6): 1127-1133. DOI: 10.3174/ajnr.A2924
17. Saksena S, Middleton DM, Krisa L, Shah P, Faro SH, Sinko R, Gaughan J, Finsterbusch J, Mulcahey MJ, Mohamed FB. Diffusion Tensor Imaging of the Normal Cervical and Thoracic Pediatric Spinal Cord. *AJNR. American journal of neuroradiology.* 2016; 37(11): 2150-2157. DOI: 10.3174/ajnr.A4883
18. Filippi CG, Andrews T, Gonyea JV, Linnell G, Cauley KA. Magnetic resonance diffusion tensor imaging and tractography of the lower spinal cord: application to diastematomyelia and tethered cord. *European radiology.* 2010; 20(9): 2194-2199. DOI: 10.1007/s00330-010-1797-4
19. Ford JC, Hackney DB, Lavi E, Phillips M, Patel U. Dependence of apparent diffusion coefficients on axonal spacing, membrane permeability, and diffusion time in spinal cord white matter. *Journal of magnetic resonance imaging: JMRI.* 1998; 8(4): 775-782. DOI: 10.1002/jmri.1880080405
20. Facon D, Ozanne A, Fillard P, Lepeintre JF, Tournoux-Facon C, Ducreux D. MR diffusion tensor imaging and fiber tracking in spinal cord compression. *AJNR. American journal of neuroradiology.* 2005; 26(6): 1587-1594.
21. Vargas MI, Delavelle J, Jlassi H, Rilliet B, Viallon M, Becker CD, Lövblad KO. Clinical applications of diffusion tensor tractography of the spinal cord. *Neuroradiology.* 2008; 50(1): 25-29. DOI: 10.1007/s00234-007-0309-y
22. Zhang J, Jones M, DeBoy CA, Reich DS, Farrell JA, Hoffman PN, Griffin JW, Sheikh KA, Miller MI, Mori S, Calabresi PA. Diffusion tensor magnetic resonance imaging of Wallerian degeneration in rat spinal cord after dorsal root axotomy. *The Journal of neuroscience : the official journal of the Society for Neuroscience.* 2009; 29(10): 3160-3171. DOI: 10.1523/JNEUROSCI.3941-08.2009
23. Cheran S, Shanmuganathan K, Zhuo J, Mirvi SE, Aarabi B, Alexander MT, Gullapalli RP. Correlation of MR diffusion tensor imaging parameters with ASIA motor scores in hemorrhagic and nonhemorrhagic acute spinal cord injury. *Journal of neurotrauma.* 2011; 28(9): 1881-1892. DOI: 10.1089/neu.2010.1741
24. Egger K, Hohenhaus M, Van Velthoven V, Heil S, Urbach H. Spinal diffusion tensor tractography for differentiation of intramedullary tumor-suspected lesions. *European journal of radiology.* 2016; 85(12): 2275-2280. DOI: 10.1016/j.ejrad.2016.10.018
25. Сысоев К.В., Тадевосян А.Р., Назинкина Ю.В., Хачатрян В.А. Результаты хирургического лечения детей с синдромом фиксированного спинного мозга. Прогноз на основании данных спинальной 3Тл МРТ-трактографии. *Журнал «Вопросы нейрохирургии» имени Н.Н. Бурденко.* 2016; 80 (3): 66-73. DOI: 10.17116/neiro201680366-73.

References:

1. Clark CA, Werring DJ, Miller DH. Diffusion imaging of the spinal cord in vivo: estimation of the principal diffusivities and application to multiple sclerosis. *Magn Reson Med.* 2000; 43(1):133-138. DOI: 10.1002/(sici)1522-2594(200001)43:1<133::aid-mrm16>3.0.co;2-x
2. Kozlowski P, Raj D, Liu J, Lam C, Yung AC, Tetzlaff W. Characterizing white matter damage in rat spinal cord with quantitative MRI and histology. *Journal of neurotrauma.* 2008; 25(6): 653-676. DOI: 10.1089/neu.2007.0462
3. Endo T, Suzuki S, Utsunomiya A, Uenohara H., Tominaga T. Prediction of neurological recovery using apparent diffusion coefficient in cases of incomplete spinal cord injury. *Neurosurgery.* 2011; 68(2): 329-336 DOI: 10.1227/NEU.0b013e3182031ce7
4. Toktas ZO, Tanrıkulu B, Koban O, Kilic T, Konya D. Diffusion tensor imaging of cervical spinal cord: A quantitative diagnostic tool in cervical spondylotic myelopathy. *Journal of craniovertebral junction & spine.* 2016; 7(1): 26-30. DOI: 10.4103/0974-8237.176617
5. Hsu Y, Chou MC, Yeh PS, Wu TC, Ko CC, Chen TY. Magnetic-Resonance Diffusion-Tensor Tractography in the Diagnosis of Tumefactive Spinal-Cord Lesions in Neuromyelitis Optica. *Diagnostics (Basel, Switzerland).* 2020; 10(6): 401. DOI: 10.3390/diagnostics10060401
6. Tikhova K.E., Savello V.E., Manukovsky V.A. Possibilities of magnetic resonance imaging in the diagnosis of spinal cord injuries in victims with cervical spine injury. *REJR,* 2021; 11(3):151-161. DOI: 10.21569/2222-7415-2021-11-3-151-161 (in Russian).
7. Isaeva Ya.O., Korostyshevskaya A.M., Savelov A.A., Yarnykh V.L. Possibilities of quantitative methods of magnetic resonance imaging (MRI) in assessing intrauterine myelination of the brain. *REJR,* 2020; 10(2):183-194. DOI:10.21569/2222-7415-2020-10-2-183-194 (in Russian).
8. Alizadeh M, Fisher J, Saksena S, Sultan Y, Conklin CJ, Middleton DM, Krisa L, Finsterbusch J, Flanders A E, Faro SH, Mulcahey MJ, Mohamed FB. Age related diffusion and tractography changes in typically developing pediatric cervi-

- cal and thoracic spinal cord. *NeuroImage. Clinical.* 2018; 18: 784-792. DOI: 10.1016/j.nicl.2018.03.014
9. Antherieu P, Levy R, De Saint Denis T, Lohkamp L, Pateroster G, Di Rocco F, Boddaert N, Zerah M. Diffusion tensor imaging (DTI) and Tractography of the spinal cord in pediatric population with spinal lipomas: preliminary study. *Childs Nerv Syst.* 2019; 35(1): 129-137. DOI: 10.1007/s00381-018-3935-2
10. Fujiyoshi K, Konomi T, Yamada M, Hikishima K, Tsuji O, Komaki Y, Momoshima S, Toyama Y, Nakamura M, Okano H. Diffusion tensor imaging and tractography of the spinal cord: from experimental studies to clinical application. *Experimental neurology.* 2013; 242: 74-82. DOI: 10.1016/j.expneurol.2012.07.015
11. Melhem ER, Mori S, Mukundan G, Kraut MA, Pomper MG, van Zijl PC. Diffusion tensor MR imaging of the brain and white matter tractography. *AJR. American journal of roentgenology.* 2002; 178(1): 3-16. DOI: 10.2214/ajr.178.1.1780003
12. Onu M, Gervai P, Cohen-Adad J, Lawrence J, Kornelsen J, Tomanek B, Sbotto-Frankensteen UN. Human cervical spinal cord funiculi: investigation with magnetic resonance diffusion tensor imaging. *Journal of magnetic resonance imaging: JMRI.* 2010; 31(4): 829-837. DOI: 10.1002/jmri.22101
13. Tsuchiya K, Fujikawa A, Honya K, Nitatori T, Suzuki Y. Diffusion tensor tractography of the lower spinal cord. *Neuroradiology.* 2008; 50(3): 221-225. DOI: 10.1007/s00234-007-0335-9
14. Ellingson BM, Ulmer JL, Kurpad SN, Schmit BD. Diffusion tensor MR imaging of the neurologically intact human spinal cord. *AJNR. American journal of neuroradiology.* 2008; 29(7): 1279-1284. DOI: 10.3174/ajnr.A1064
15. Calabrese E, Adil SM, Cofer G, Perone CS, Cohen-Adad J, Lad SP, Johnson GA. Postmortem diffusion MRI of the entire human spinal cord at microscopic resolution. *NeuroImage. Clinical.* 2018; 18: 963-971. DOI: 10.1016/j.nicl.2018.03.029
16. Barakat N, Mohamed FB, Hunter LN, Shah P, Faro SH, Samdani AF, Finsterbusch J, Betz R, Gaughan J, Mulcahey MJ. Diffusion tensor imaging of the normal pediatric spinal cord using an inner field of view echo-planar imaging sequence. *AJNR. American journal of neuroradiology.* 2012; 33(6): 1127-1133. DOI: 10.3174/ajnr.A2924
17. Saksena S, Middleton DM, Krisa L, Shah P, Faro SH, Sinko R, Gaughan J, Finsterbusch J, Mulcahey MJ, Mohamed FB. Diffusion Tensor Imaging of the Normal Cervical and Thoracic Pediatric Spinal Cord. *AJNR. American journal of neuroradiology.* 2016; 37(11): 2150-2157. DOI: 10.3174/ajnr.A4883
18. Filippi CG, Andrews T, Gonyea JV, Linnell G, Cauley KA. Magnetic resonance diffusion tensor imaging and tractography of the lower spinal cord: application to diastematomyelia and tethered cord. *European radiology.* 2010; 20(9): 2194-2199. DOI: 10.1007/s00330-010-1797-4
19. Ford JC, Hackney DB, Lavi E, Phillips M, Patel U. Dependence of apparent diffusion coefficients on axonal spacing, membrane permeability, and diffusion time in spinal cord white matter. *Journal of magnetic resonance imaging: JMRI.* 1998; 8(4): 775-782. DOI: 10.1002/jmri.1880080405
20. Facon D, Ozanne A, Fillard P, Lepeintre JF, Tournoux-Facon C, Ducreux D. MR diffusion tensor imaging and fiber tracking in spinal cord compression. *AJNR. American journal of neuroradiology.* 2005; 26(6): 1587-1594.
21. Vargas MI, Delavelle J, Jlassi H, Rilliet B, Viallon M, Becker CD, Lövblad KO. Clinical applications of diffusion tensor tractography of the spinal cord. *Neuroradiology.* 2008; 50(1): 25-29. DOI: 10.1007/s00234-007-0309-y
22. Zhang J, Jones M, DeBoy CA, Reich DS, Farrell JA, Hoffman PN, Griffin JW, Sheikh KA, Miller MI, Mori S, Calabrese PA. Diffusion tensor magnetic resonance imaging of Wallerian degeneration in rat spinal cord after dorsal root axotomy. *The Journal of neuroscience : the official journal of the Society for Neuroscience.* 2009; 29(10): 3160-3171. DOI: 10.1523/JNEUROSCI.3941-08.2009
23. Cheran S, Shanmuganathan K, Zhuo J, Mirvi SE, Aarabi B, Alexander MT, Gullapalli RP. Correlation of MR diffusion tensor imaging parameters with ASIA motor scores in hemorrhagic and nonhemorrhagic acute spinal cord injury. *Journal of neurotrauma.* 2011; 28(9): 1881-1892. DOI: 10.1089/neu.2010.1741
24. Egger K, Hohenhaus M, Van Velthoven V, Heil S, Urbach H. Spinal diffusion tensor tractography for differentiation of intramedullary tumor-suspected lesions. *European journal of radiology.* 2016; 85(12): 2275-2280. DOI: 10.1016/j.ejrad.2016.10.018
25. Sysoev KV, Tadevosyan AR, Nazinkina YuV, Khachatryan VA. Surgical treatment outcomes in children with tethered spinal cord syndrome. A prognosis on the basis of spinal 3T MRI tractography. *Burdenko's Journal of Neurosurgery.* 2016; 80 (3): 66-73 DOI: 10.17116/neiro201680366-73 (in Russian).