

ДИФФУЗИОННО-ВЗВЕШЕННАЯ МАГНИТНО-РЕЗОНАНСНАЯ ТОМОГРАФИЯ В ДИАГНОСТИКЕ КОМПРЕССИИ КОРЕШКОВ СПИННОГО МОЗГА ПРИ ГРЫЖАХ ПОЯСНИЧНЫХ МЕЖПОЗВОНКОВЫХ ДИСКОВ

DOI: 10.17691/stm2019.11.3.14

УДК 616.883.53–073.756.8:616.721.1–007.43

Поступила 18.06.2018 г.



И.А. Степанов, аспирант кафедры нейрохирургии и инновационной медицины¹;
Н.А. Тетюшкин, клинический ординатор кафедры нейрохирургии и инновационной медицины¹;
М.А. Шамеева, ординатор кафедры нейрохирургии и инновационной медицины¹;
В.А. Бывальцев, д.м.н., зав. кафедрой нейрохирургии и инновационной медицины¹;
 зам. директора по инновационной и международной деятельности²;
 профессор кафедры травматологии, ортопедии и нейрохирургии³;
 руководитель Центра нейрохирургии⁴

¹Иркутский государственный медицинский университет, ул. Красного Восстания, 1, Иркутск, 664003;

²Иркутский научный центр хирургии и травматологии, ул. Борцов Революции, 1 г, Иркутск, 664003;

³Иркутская государственная медицинская академия последипломного образования — филиал Российской медицинской академии непрерывного профессионального образования МЗ РФ, ул. Юбилейный микрорайон, 100, Иркутск, 664049;

⁴Дорожная клиническая больница на станции «Иркутск-Пассажирский» ОАО «РЖД-Медицина», ул. Боткина, 10, Иркутск, 664005

Цель исследования — оценить возможности использования диффузионно-взвешенной МРТ (ДВ МРТ) в диагностике компрессии дорсальных спинальных ганглиев и корешков спинного мозга при грыжах поясничных межпозвонковых дисков (МПД).

Материалы и методы. В исследование включены 37 пациентов (19 мужчин, 18 женщин, средний возраст — 42,6±12,7 года) с радикулярным синдромом, обусловленным грыжей МПД пояснично-крестцового отдела позвоночника. Во всех случаях диагноз подтверждался с помощью клиничко-неврологического осмотра пациента, выполнения поясничной спондилографии, МСКТ- и МРТ-исследований (в том числе и в режиме ДВ МРТ). В качестве контрольной группы участвовали 29 добровольцев (16 мужчин, 13 женщин, средний возраст — 37,4±9,6 года), не имеющих клиничко-неврологических и нейровизуализационных признаков дегенеративного заболевания поясничных МПД.

Результаты. Значение измеряемого коэффициента диффузии (ИКД) компримированного грыжей МПД корешка L5 в среднем составило 1634,7 мм²/с, а интактного — 1109,2 мм²/с. При этом значение ИКД для правостороннего корешка S1 без признаков компрессии составило 1392,5 мм²/с, а для левостороннего — 1375,7 мм²/с. Среднее значение ИКД для проксимальных отделов корешков спинного мозга на стороне расположения грыжи МПД составило 1441,2±13,7 мм²/с, а для корешков на интактной стороне — 1243,9±17,6 мм²/с (p<0,001). Средние значения ИКД для дистальных отделов корешков на стороне дегенерации МПД и на интактной стороне составили 1446,8±173,4 и 1107,5±76,1 мм²/с соответственно (p<0,001). Между ИКД дорсального спинального ганглия и степенью выраженности боли по ВАШ имеет место достоверная прямая зависимость (r_s=0,089; p=0,012).

Заключение. Особенность компримированных дорсальных спинальных ганглиев и корешков спинного мозга — высокие значения ИКД, что отражает микроструктурные изменения их в виде отека, димиелинизации и аоксального повреждения. ДВ МРТ, которая позволяет подсчитывать ИКД, является весьма перспективным методом неинвазивной инструментальной диагностики компрессионных корешковых синдромов у пациентов с дегенеративным заболеванием МПД.

Ключевые слова: диффузионно-взвешенная МРТ; измеряемый коэффициент диффузии; дорсальный спинальный ганглий; корешок спинного мозга; грыжа межпозвонкового диска.

Как цитировать: Stepanov I.A., Tetyushkin N.A., Shameeva M.A., Byvaltsev V.A. Diffusion-weighted magnetic resonance imaging in diagnostics of spinal nerve root compression in patients with lumbar intervertebral disc herniation. *Sovremennye tehnologii v medicine* 2019; 11(3): 104–110, <https://doi.org/10.17691/stm2019.11.3.14>

Для контактов: Бывальцев Вадим Анатольевич, e-mail: vadimabyvaltsev@gmail.com

Diffusion-Weighted Magnetic Resonance Imaging in Diagnostics of Spinal Nerve Root Compression in Patients with Lumbar Intervertebral Disc Herniation

I.A. Stepanov, PhD Student, Department of Neurosurgery and Innovative Medicine¹;
 N.A. Tetyushkin, Clinical Resident, Department of Neurosurgery and Innovative Medicine¹;
 M.A. Shameeva, Clinical Resident, Department of Neurosurgery and Innovative Medicine¹;
 V.A. Byvaltsev, MD, DSc, Head of the Department of Neurosurgery and Innovative Medicine¹;
 Deputy Director of Innovative and International Affairs²; Professor, Department of Traumatology, Orthopedics, and Neurosurgery³; Chief of the Neurosurgery Center⁴

¹Irkutsk State Medical University, 1 Krasnogo Vosstaniya St., Irkutsk, 664003, Russia;

²Irkutsk Scientific Center of Surgery and Traumatology, 1G Bortsov Revolyutsii St., Irkutsk, 664003, Russia;

³Irkutsk State Medical Academy for Postgraduate Education — Branch of the Russian Medical Academy of Continuing Professional Education of the Ministry Healthcare of the Russian Federation, 100 Yubileyny Microdistrict, Irkutsk, 664049, Russia;

⁴Railway Clinical Hospital at the Irkutsk-Passagirsky Station of RZD-Medicine, 10 Botkin St., Irkutsk, 664005, Russia

The aim of the study was to evaluate possibilities of using diffusion-weighted MRI (DW MRI) in diagnostics of compression of dorsal spinal ganglia and spinal nerve roots in patients with lumbar intervertebral disc herniation (IVD).

Materials and Methods. The study involved 37 patients (19 males, 18 females, average age — 42.6 ± 12.7) with radicular syndrome caused by an IVD hernia of the lumbosacral spine. In all the cases, the diagnosis was confirmed by a clinical-neurological examination of a patient, radiography of the lumbar spine, multi-layer spiral CT and MRI investigations (including DW MRI). The control group included 29 volunteers (16 males, 13 females, average age — 37.4 ± 9.6), who do not have clinical neurological and neuroimaging signs of a degenerative disease of lumbar IVD.

Results. Average value of the measured diffusion coefficient (MDC) compressed by the hernia of L5 IVD root amounted to $1634.7 \text{ mm}^2/\text{s}$, and the value of the intact — to $1109.2 \text{ mm}^2/\text{s}$. MDC for the right-sided S1 root without compression signs was $1392.5 \text{ mm}^2/\text{s}$, while for the left-sided one it was $1375.7 \text{ mm}^2/\text{s}$. The average MDC value for proximal regions of the spinal roots on the hernia side was $1441.2 \pm 13.7 \text{ mm}^2/\text{s}$, and for the roots on the intact side it was $1243.9 \pm 17.6 \text{ mm}^2/\text{s}$ ($p < 0.001$). Average MDC values for the distal regions of the roots on the degenerated IVD side were 1446.8 ± 173.4 and $1107.5 \pm 76.1 \text{ mm}^2/\text{s}$, respectively ($p < 0.001$). There is an evident direct correlation between MDC of the dorsal spinal ganglion and pain intensity according to VAS ($r_s = 0.089$; $p = 0.012$).

Conclusion. A specificity of compressed dorsal spinal ganglia and spinal nerve roots is their high MDC values which show microstructural changes manifested by edema, demyelination, and axonal injury. DW MRI, which enables the MDC to be calculated, is a perspective method of non-invasive instrumental diagnostics of compression nerve root syndromes in patients with degenerative IVD diseases.

Key words: diffusion-weighted MRI; measured diffusion coefficient; dorsal spinal ganglion; spinal nerve root; intervertebral disc hernia.

Введение

Корешковая боль при ишиасе впервые описана нейрохирургом Гарвардского университета Вильямом Микстером (William Mixer) и его коллегой ортопедом Джозефом Барром (Joseph Barr) в 1934 г. [1]. Авторы наглядно продемонстрировали, что в основе развития данного болевого синдрома лежит компрессия корешка спинного мозга фрагментом межпозвоночного диска (МПД), однако патофизиология боли при таком состоянии по-прежнему остается до конца не раскрытой. В настоящее время все больше исследователей сходятся во мнении, что в развитии корешкового болевого синдрома ключевая роль

отводится дорсальному спинальному ганглию (ДСГ) [2, 3].

Диффузионно-взвешенная магнитно-резонансная томография (ДВ МРТ) — это современный инструментальный неинвазивный метод, основанный на измерении степени диффузии свободных молекул воды в различных тканях [4]. Количественной мерой степени диффузии молекул воды в ткани служит измеряемый коэффициент диффузии (ИКД). Множество значений ИКД для исследуемой биологической структуры представляет собой функциональную карту диффузионно-взвешенных изображений (ДВИ) [5]. Ранее нами получены успешные результаты применения ДВ МРТ для диагностики степени дегенеративного заболевания

МПД и его посмертных изменений [6–10]. Имеются работы, свидетельствующие, что методика ДВ МРТ с измерением ИКД позволяет диагностировать различные патологические состояния центральной и периферической нервной системы: рассеянный склероз [11], карпальный туннельный синдром [12] и различные демиелинизирующие процессы [13].

Нейровизуализация спинного мозга и его корешков путем построения карт ДВИ представляет собой сложную техническую задачу, что обусловлено небольшими размерами спинного мозга, наличием множественных артефактов от окружающих тканей и артефактов, связанных с дыхательными движениями пациента [14]. Тем не менее Т. Takahara и соавт. [15] в своем исследовании доказали, что визуализация спинного мозга, его корешков и периферических нервов с помощью ДВ МРТ является вполне доступным диагностическим методом.

Поиск литературных источников в современных базах данных выявил наличие единственного сообщения, посвященного изучению роли ДВ МРТ в диагностике компрессии ДСГ и корешков спинного мозга при грыжах поясничных МПД. При этом полученные авторами данные весьма неоднозначны [16].

Цель исследования — оценить возможности использования диффузионно-взвешенной МРТ в диагностике компрессии дорсальных спинальных ганглиев и корешков спинного мозга при грыжах поясничных межпозвоноковых дисков.

Материалы и методы

Открытое нерандомизированное когортное монументальное ретроспективное исследование проводилось в период с февраля 2017 г. по май 2018 г. на базе Центра нейрохирургии Дорожной клинической больницы на станции «Иркутск-Пассажирский» ОАО «РЖД-Медицина».

В исследование включены 37 пациентов (19 мужчин, 18 женщин, средний возраст — $42,6 \pm 12,7$ года) с радикулярным синдромом, обусловленным грыжей МПД пояснично-крестцового отдела позвоночника. Во всех случаях диагноз был подтвержден с помощью клинко-неврологического осмотра пациента, данными поясничной спондилографии, МСКТ- и МРТ-исследований пояснично-крестцового отдела позвоночника. В качестве контрольной группы участвовали 29 добровольцев (16 мужчин, 13 женщин, средний возраст — $37,4 \pm 9,6$ года), не имеющих клинко-неврологических и нейровизуализационных признаков дегенеративного заболевания поясничных МПД.

Критериями исключения из исследования являлись: 1) наличие би- или полирадикулярной клинко-неврологической симптоматики; 2) центральный стеноз позвоночного канала; 3) проведение оперативных вмешательств на пояснично-крестцовом отделе позвоночника в анамнезе.

Клинко-неврологическое исследование пациен-

та включало в себя изучение неврологического статуса (наличие двигательных и чувствительных расстройств), анализ степени выраженности болевого синдрома по данным визуальной аналоговой шкалы (ВАШ) и анализ качества жизни пациентов по индексу Освестри (Oswestry Disability Index, ODI).

Поясничную спондилографию выполняли с помощью аппарата Digital Diagnost (Philips, Нидерланды), МСКТ-исследование пояснично-крестцового отдела позвоночника — с помощью аппарата Somatom Perspective 64 (Siemens, Германия).

Диффузионно-взвешенную МРТ с построением карт ДВИ проводили на аппарате Magnetom Essenza 1,5 T (Siemens, Германия). При исследовании в режиме T1-взвешенных изображений (T1-ВИ) использовали следующие параметры: матрица — 384×387 , TR (время повторения) — 650 мс; TE (время эха) — 9,6 мс; NEX (число возбуждений) — 1; толщина среза — 4 мм; FOV (поле зрения) — 30×30 ; в режиме T2-ВИ: матрица — 384×288 ; TR — 4000 мс; TE — 43 мс; NEX — 1; толщина среза — 4 мм; FOV — 30×30 .

Для получения карт ДВИ применяли следующий набор параметров опции ДВ МРТ с SE-эхо-планарным изображением (EPI): матрица — 160×128 ; TR — 7500 мс; TE — 83 мс; NEX — 6; толщина среза — 4 мм; FOV — 30×30 . Использованы значения коэффициента b, равные 400 и 800, время сканирования — 6 мин 30 с.

Измеряемый коэффициент диффузии вычисляли в режиме T2-ВИ с помощью программы RadiAnt DICOM Viewer. Полученные значения служили для построения функциональных карт ДВИ. Полученные T1-ВИ, T2-ВИ и карты ДВИ использовали для измерения морфометрических параметров (длины и ширины) ДСГ и вычисления значений ИКД в группе пациентов с грыжами поясничных МПД и в группе добровольцев без признаков дегенерации МПД.

Протокол исследования одобрен Этическим комитетом Иркутского государственного медицинского университета. Исследование проводилось в соответствии с принципами надлежащей клинической практики и Хельсинкской декларации [17]. Перед началом исследования пациенты предоставили письменное информированное согласие.

Статистическая обработка данных выполнялась с использованием программного обеспечения Microsoft Excel 2010. Сравнение значений ИКД в двух исследуемых группах проведено с помощью критерия Манна-Уитни. Корреляционный анализ зависимости между значениями ИКД и клиническими параметрами (степень выраженности боли по ВАШ, качество жизни по индексу ODI) выполнен с использованием коэффициента корреляции Спирмена (r_s). Степень корреляционной зависимости определяли следующим образом: при значении $r_s > 0,7$ она оценивалась как выраженная корреляционная зависимость, при $0,5 < r_s \leq 0,7$ — как умеренная и при $r_s < 0,5$ — как слабая. Статистически значимыми считали различия при $p < 0,05$.

Результаты

При исследовании группы здоровых добровольцев без признаков дегенеративного заболевания поясничных МПД с помощью ДВ МРТ и последующего построения карт ДВИ визуализированы корешки спинного мозга нижнепоясничного отдела позвоночника (от L4 до S1). Средние значения длины ДСГ L4, L5 и S1 составили $7,1 \pm 1,3$; $9,5 \pm 1,7$ и $6,3 \pm 0,6$ мм соответственно, средние значения ширины — $5,1 \pm 0,7$; $6,3 \pm 0,6$ и $5,8 \pm 0,5$ мм соответственно. Достоверных различий в длине и ширине между левосторонними и правосторонними ДСГ не обнаружено. Необходимо отметить, что длина ДСГ возрастала от уровня L4 до уровня S1, а ширина ДСГ возрастала до уровня L5 и уменьшалась на уровне S1.

Средние значения ИКД для ДСГ L4, L5 и S1 у здоровых добровольцев составили $1124,6 \pm 117,3$; $1239,3 \pm 121,5$ и $1261,2 \pm 117,4$ мм²/с соответственно. Средние значения ИКД для указанных корешков спинного мозга составили $1121,8 \pm 98,5$; $1127,5 \pm 87,3$ и $1165,6 \pm 103,7$ мм²/с соответственно. Статистически значимых различий между значениями ИКД ДСГ и корешков спинного мозга на правой и левой стороне не отмечено. ИКД ДСГ и корешков спинного мозга возрастали от уровня L4 до S1.

При выполнении ДВ МРТ-исследования пояснично-крестцового отдела позвоночника в различных режимах у пациентов с грыжами МПД отмечены признаки компрессии и отека ДСГ и проксимального отдела корешков спинного мозга (рис. 1, а–е). При верификации фораминальных грыж МПД метод ДВ МРТ позволяет достоверно оценить состояние невралгических структур. Так, значение ИКД компримированного грыжей МПД L5 корешка спинного мозга составило $1634,7$ мм²/с, а интактного корешка — $1109,2$ мм²/с (рис. 1, в, д). При этом значение ИКД для правостороннего корешка S1 без признаков компрессии составило $1392,5$ мм²/с и для левостороннего — $1375,7$ мм²/с. Статистически значимых различий между указанными параметрами для левосторонних и правосторонних корешков спинного мозга не обнаружено.

Среднее значение ИКД для проксимальных отделов корешков спинного мозга на стороне расположения грыжи МПД составило $1441,2 \pm 13,7$ мм²/с, а для корешков на интактной стороне — $1243,9 \pm 17,6$ мм²/с ($p < 0,001$). Средние значения ИКД для дистальных отделов корешков на стороне

дегенерации МПД и на интактной стороне составили $1446,8 \pm 173,4$ и $1107,5 \pm 76,1$ мм²/с соответственно ($p < 0,001$) (рис. 2).

Для упрощения оценки состояния невралгических структур с помощью построения карт ДВИ и подсчета ИКД нами введен коэффициент R, представляющий собой отношение ИКД невралгической структуры (ДСГ или корешка спинного мозга) на стороне расположения

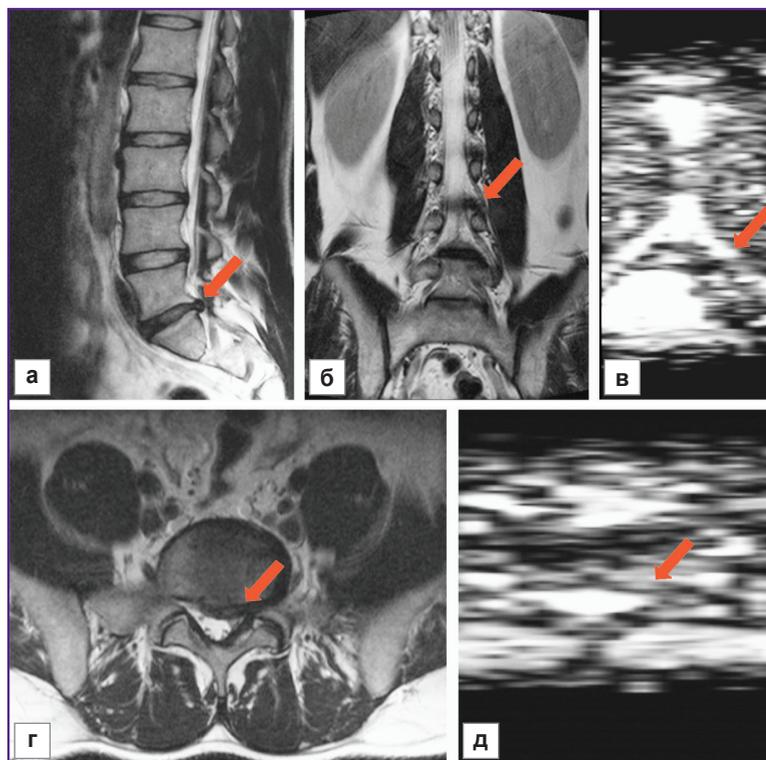


Рис. 1. ДВ МРТ-изображения пояснично-крестцового отдела позвоночника, на уровне L₄–S₁ визуализируется левосторонняя фораминальная грыжа МПД с компрессией L5 корешка спинного мозга (указано стрелкой):

а — T2-ВИ, сагиттальный срез; б — T2-ВИ, фронтальный срез; в — карта ДВИ, фронтальный срез (ИКД проксимального отдела корешка L5 составляет 1241 мм²/с); г — T2-ВИ, аксиальный срез; д — карта ДВИ, аксиальный срез (ИКД левого ДСГ на указанном уровне составляет 1439 мм²/с)

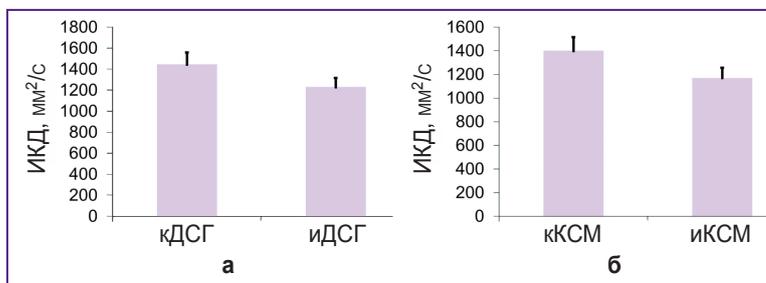


Рис. 2. Сравнение средних значений ИКД:

а — компримированных грыжей межпозвонкового диска (кДСГ) и интактных (идДСГ) дорсальных спинальных ганглиев ($p < 0,01$); б — компримированных (кКСМ) и интактных (икКСМ) корешков спинного мозга ($p < 0,001$)

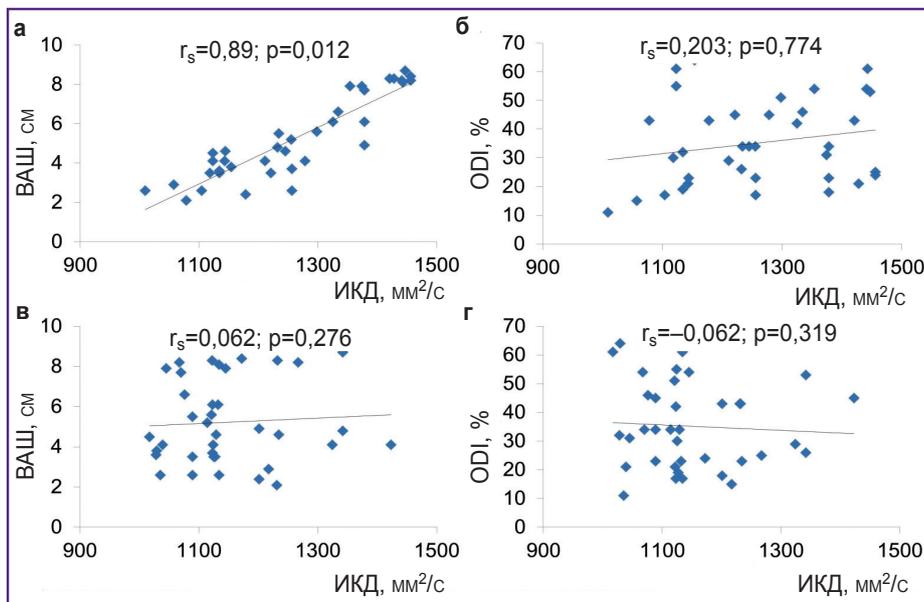


Рис. 3. Анализ корреляционной зависимости между ИКД ДСГ и проксимального отдела корешков спинного мозга и клиническими параметрами:
 а — между ИКД ДСГ и степенью выраженности по ВАШ; б — между ИКД ДСГ и качеством жизни пациентов по индексу ODI; в — между ИКД проксимального отдела корешков и степенью выраженности по ВАШ; г — между ИКД проксимального отдела корешков и качеством жизни пациентов по индексу ODI

грыжи МПД к ИКД невральнoй структуры на интактноy стороне. Коэффициенты R для ДСГ и проксимальногo отдела корешка спинного мозга на стороне грыжи МПД составили 1,16 и 1,32, а на интактноy стороне — 0,98 ($p < 0,01$) и 1,0 ($p < 0,001$) соответственно.

Анализ морфометрических параметров ДСГ показал на стороне грыжи МПД и интактноy стороне достоверные различия в значениях длины — $15,3 \pm 2,2$ и $10,6 \pm 1,3$ мм соответственно ($p < 0,01$) и ширины — $6,7 \pm 0,8$ и $5,8 \pm 0,6$ мм соответственно ($p < 0,001$).

При оценке клинико-неврологической симптоматики у пациентов с дегенеративным заболеванием поясничных МПД у 23 человек (62,1%) верифицированы признаки радикулоневралгии, в 10 случаях (27,02%) — радикулоневрит и у 4 (10,8%) — признаки радикулопатии [18]. Средние значения выраженности болевого синдрома по ВАШ и качества жизни по индексу ODI составили $6,2 \pm 3,3$ см и $59,8 \pm 14,5\%$. Анализ корреляционной зависимости между значениями ИКД ДСГ, корешков спинного мозга и клиническими параметрами показал, что между ИКД ДСГ и степенью выраженности боли по ВАШ имеет место статистически значимая прямая зависимость ($r_s = 0,089$; $p = 0,012$) (рис. 3).

Обсуждение

Как уже сообщалось, основная роль в развитии корешкового болевого синдрома при грыжах МПД отводится ДСГ. При компрессии невральнoх структур грыжами МПД отмечаются два основных патофизиологических процесса — собственно механическая компрессия корешков спинного мозга и сдавление сосудов, участвующих в питании последних [18].

Еще К. Olmarker и соавт. в 1989 г. [19] показали, что длительное сдавление корешков спинного мозга приводит к их отеку и демиелинизации. Морфологические

исследования пациентов с выраженной степенью фораминального стеноза подтверждают наличие дегенеративных изменений корешков спинного мозга [20]. Как правило, указанные дегенеративные изменения включают в себя демиелинизацию и утрату аксонов. В наблюдении К. Takata и соавт. [21] с помощью данных МСКТ-миелографии показано, что при грыжах поясничных МПД наблюдается выраженный отек корешков спинного мозга. Т. Тоупе и соавт. [22] установили, что выполнение МРТ-исследования пояснично-крестцового отдела позвоночника с внутривенным контрастированием позволяет наиболее четко визуализировать компримированные грыжей МПД невральнoе структуры. Некоторые авторы считают, что такого рода улучшение визуализации связано с частичным повреждением гистогематического барьера «кровь-корешок» [23]. Другие [24] полагают, что улучшение визуализации компримированных грыжей МПД корешков при выполнении МРТ-исследования с введением контрастного препарата обусловлено варикозным расширением ветвей корешковых вен, которые и усиливают интенсивность сигнала на МРТ-изображениях. В работах [25, 26] отмечено, что усиление сигнала от корешков спинного мозга после выполнения декомпрессивных оперативных вмешательств связано с нанесением нейрохирургом микротравм. С другой стороны, продемонстрировано [27], что МРТ-миелография позволяет верифицировать отек корешков спинного мозга, при этом степень отека достоверно коррелирует с клинико-неврологическими проявлениями грыж поясничных МПД.

V. Valiyan и соавт. [28] в своем исследовании показали, что при повреждении периферических нервов в раннем периоде (до 6 сут) по данным построенных карт ДВИ наблюдается ограничение степени диффузии свободных молекул воды. Однако спустя 1–4 нед после повреждения нервов средние значения ИКД

значительно возрастают, что отражает микроструктурные изменения нервной ткани в виде демиелинизации, отека и аксонального повреждения. В работе [29] также подтверждено значительное повышение средних значений ИКД при повреждении седалищного нерва у лягушек в эксперименте.

Предыдущие исследования, изучающие применение ДВ МРТ с измерением ИКД в диагностике различных патологических состояний нервной системы, продемонстрировали высокую чувствительность и специфичность данной методики в диагностике рассеянного склероза, карпального туннельного синдрома и различных демиелинизирующих процессов [13–15]. Использование ДВ МРТ в диагностике компрессии корешков спинного мозга при дегенеративном заболевании МПД мы смогли обнаружить лишь в работе [16]. Стоит отметить, что данное исследование, к сожалению, не лишено недостатков. Так, оно рассматривает незначительное количество как респондентов с дегенерацией поясничных МПД, так и здоровых добровольцев. В работе не учитывается клинично-неврологическая симптоматика пациентов с ишиасом, что является важнейшим аспектом в диагностике компрессии корешков спинного мозга при грыжах поясничных МПД. Согласно нашим данным, компримированные грыжами поясничных МПД корешки и ДСГ спинного мозга имеют достоверно высокие значения ИКД в отличие от интактных корешков и ДСГ. Можно предположить, что такие высокие значения ИКД обусловлены отеком и демиелинизацией указанных невралных структур. В целом полученные нами результаты во многом согласуются с данными Y. Eguchi и соавт. [16].

Настоящее исследование тоже не лишено недостатков, которые необходимо обозначить. Во-первых, оно имеет ретроспективный характер и включает в себя небольшое количество пациентов, что не могло не отразиться на результатах статистической обработки данных. Во-вторых, при определении значений ИКД ДСГ и корешков спинного мозга нами не выделены зоны интереса (region of interests), что также не могло не повлиять на подсчет значений ИКД. В третьих, в работе не учитывались данные электронейромиографического исследования пациентов, которые позволяют достоверно оценить состояние корешков спинного мозга. И наконец, в исследовании не учтены морфологические типы грыж МПД, такие как протрузии и экструзии.

Заключение

Проведенное исследование наглядно показывает эффективность использования ДВ МРТ с построением карт ДВИ и подсчетом значений ИКД в диагностике компрессии корешков спинного мозга при грыжах поясничных МПД. Между выраженностью болевого синдрома по ВАШ и значениями ИКД ДСГ отмечена статистически значимая прямая корреляционная за-

висимость. Основная особенность компримированных ДСГ и корешков спинного мозга — высокие значения ИКД, что, по всей вероятности, отражает микроструктурные изменения последних в виде отека, демиелинизации и аксонального повреждения. Мы считаем, что ДВ МРТ является весьма перспективным методом неинвазивной инструментальной диагностики компрессионных корешковых синдромов у пациентов с дегенеративным заболеванием МПД.

Финансирование исследования. Исследование выполнено при поддержке Фонда содействия инновациям (проект №40838).

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликтов интересов, о которых необходимо сообщить.

Литература/References

1. Mixer W.J., Barr J.S. Rupture of the intervertebral disc with involvement of the spinal canal. *N Engl J Med* 1934; 211: 210–215, <https://doi.org/10.1056/nejm193408022110506>.
2. Krames E.S. The dorsal root ganglion in chronic pain and as a target for neuromodulation: a review. *Neuromodulation* 2015; 18(1): 24–32, <https://doi.org/10.1111/ner.12247>.
3. Forget P., Boyer T., Steyaert A., Masquelier E., Deumens R., Le Polain de Waroux B. Clinical evidence for dorsal root ganglion stimulation in the treatment of chronic neuropathic pain. A review. *Acta Anaesthesiol Belg* 2015; 66(2): 37–41.
4. Byvaltsev V.A., Stepanov I.A., Kalinin A.A., Shashkov K.V. Diffusion-weighted magnetic resonance tomography in the diagnosis of intervertebral disk degeneration. *Biomedical Engineering* 2016; 50(4): 253–256, <https://doi.org/10.1007/s10527-016-9632-0>.
5. Бывальцев В.А., Степанов И.А., Калинин А.А., Белых Е.Г. Диффузионно-взвешенная магнитно-резонансная томография в диагностике дегенерации межпозвонковых дисков пояснично-крестцового отдела позвоночника. *Вестник рентгенологии и радиологии* 2016; 97(6): 357–364. Byvaltsev V.A., Stepanov I.A., Kalinin A.A., Belykh E.G. Diffusion-weighted magnetic resonance imaging in the diagnosis of intervertebral disc degeneration in the lumbosacral spine. *Vestnik rentgenologii i radiologii* 2016; 97(6): 357–364.
6. Byvaltsev V.A., Stepanov I.A., Kalinin A.A., Belykh E.G. Quantitative assessment of the degree of degenerative change in intervertebral disks using diffusion-weighted images. *Biomedical Engineering* 2017; 51(4): 275–279, <https://doi.org/10.1007/s10527-017-9730-7>.
7. Byvaltsev V.A., Kolesnikov S.I., Belykh E.G., Stepanov I.A., Kalinin A.A., Bardanova L.A., Sudakov N.P., Klimenkov I.V., Nikiforov S.B., Semenov A.V., Perfil'ev D.V., Bespyatykh I.V., Antipina S.L., Giers M., Prul M. Complex analysis of diffusion transport and microstructure of an intervertebral disk. *Bull Exp Biol Med* 2017; 164(2): 223–228, <https://doi.org/10.1007/s10517-017-3963-z>.
8. Бывальцев В.А., Степанов И.А., Семенов А.В., Перфильев Д.В., Белых Е.Г., Барданова Л.А., Никифоров С.Б., Судаков Н.П., Беспятых И.В., Антипина С.Л. Возможности диагностики давности наступления смерти по изменениям

в поясничных межпозвоночных дисках (сопоставление морфологических, иммуногистохимических и топографических результатов). Судебно-медицинская экспертиза 2017; 60(4): 4–8. Byval'tsev V.A., Stepanov I.A., Semenov A.V., Perfil'ev D.V., Belykh E.G., Bardonova L.A., Nikiforov S.B., Sudakov N.P., Bespyatykh I.V., Antipina S.L. The possibilities for diagnostics of prescription of death coming based on the changes in the lumbar intervertebral disks (the comparison of the morphological, immunohistochemical and topographical findings). *Sudebno-meditsinskaya ekspertiza* 2017; 60(4): 4–8.

9. Belykh E., Kalinin A.A., Patel A.A., Miller E.J., Bohl M.A., Stepanov I.A., Bardonova L.A., Kerimbaev T., Asantsev A.O., Giers M.B., Preul M.C., Byval'tsev V.A. Apparent diffusion coefficient maps in the assessment of surgical patients with lumbar spine degeneration. *PLoS One* 2017; 12(8): e0183697, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0183697>.

10. Бывальцев В.А., Степанов И.А., Калинин А.А., Бельх Е.Г. Применение измеряемого коэффициента диффузии в диагностике дегенерации поясничных межпозвоночных дисков у пациентов пожилого и старческого возраста методом диффузионно-взвешенной МРТ. Успехи геронтологии 2018; 31(1): 103–109. Byval'tsev V.A., Stepanov I.A., Kalinin A.A., Belykh E.G. The use of apparent diffusion coefficient in diagnosis of lumbar intervertebral disk degeneration in patients with middle and old age by diffusion-weighted MRI. *Uspekhi gerontologii* 2018; 31(1): 103–109.

11. Ohgiya Y., Oka M., Hiwatashi A., Liu X., Kakimoto N., Westesson P.A., Sven E., Ekholm S. Diffusion tensor MR imaging of the cervical spinal cord in patients with multiple sclerosis. *Eur Radiol* 2007; 17(10): 2499–2504, <https://doi.org/10.1007/s00330-007-0672-4>.

12. Hiltunen J., Suortti T., Arvela S., Seppa M., Joensuu R., Hari R. Diffusion tensor imaging and tractography of distal peripheral nerves at 3 T. *Clin Neurophysiol* 2005; 116: 2315–2323, <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2005.05.014>.

13. Martín Noguerol T., Barousse R., Socolovsky M., Luna A. Quantitative magnetic resonance (MR) neurography for evaluation of peripheral nerves and plexus injuries. *Quant Imaging Med Surg* 2017; 7(4): 398–421, <https://doi.org/10.21037/qims.2017.08.01>.

14. Yamashita T., Kwee T.C., Takahara T. Whole-body magnetic resonance neurography. *N Engl J Med* 2009; 361(5): 538–539, <https://doi.org/10.1056/nejmc0902318>.

15. Takahara T., Imai Y., Yamashita T., Yasuda S., Nasu S., Van Cauteren M. Diffusion weighted whole body imaging with background body signal suppression (DWIBS): technical improvement using free breathing, STIR and high resolution 3D display. *Radiat Med* 2004; 22(4): 275–282.

16. Eguchi Y., Ohtori S., Yamashita M., Yamauchi K., Suzuki M., Orita S., Kamoda H., Arai G., Ishikawa T., Miyagi M., Ochiai N., Kishida S., Inoue G., Masuda Y., Ochi S., Kikawa T., Toyone T., Takaso M., Aoki Y., Takahashi K. Diffusion-weighted magnetic resonance imaging of symptomatic nerve root of patients with lumbar disk herniation. *Neuroradiology* 2011; 53(9): 633–641, <https://doi.org/10.1007/s00234-010-0801-7>.

17. Williams J.R. The declaration of Helsinki and public

health. *Bull World Health Organ* 2008; 86(8): 650–652, <https://doi.org/10.2471/blt.08.050955>.

18. Благодатский М.Д., Мейерович С.И. Диагностика и лечение дискогенного пояснично-крестцового радикулита. Иркутск: Изд-во Иркутского ун-та; 1987; 271 с. Blagodatskiy M.D., Meyerovich S.I. *Diagnostika i lechenie diskogenogo poyasnichno-kresttsovogo radikulita* [Diagnosis and treatment of discogenic lumbosacral radiculitis]. Irkutsk: Izd-vo Irkutskogo un-ta; 1987; 271 p.

19. Olmarker K., Rydevik B., Holm S. Edema formation in spinal nerve roots induced by experimental, graded compression: an experimental study on the pig cauda equina with special reference to differences in effects between rapid and slow onset of compression. *Spine* 1989; 14(6): 569–573, <https://doi.org/10.1097/00007632-198906000-00003>.

20. Xue F., Wei Y., Chen Y., Wang Y., Gao L. A rat model for chronic spinal nerve root compression. *Eur Spine J* 2014; 23(2): 435–446, <https://doi.org/10.1007/s00586-013-2990-3>.

21. Takata K., Inoue S., Takahashi K., Ohtsuka Y. Swelling of the cauda equina in patients who have herniation of a lumbar disc. A possible pathogenesis of sciatica. *J Bone Joint Surg Am* 1988; 70(3): 361–368, <https://doi.org/10.2106/00004623-198870030-00007>.

22. Toyone T., Takahashi K., Kitahara H., Yamagata M., Murakami M., Moriya H. Visualisation of symptomatic nerve roots. Prospective study of contrast-enhanced MRI in patients with lumbar disc herniation. *J Bone Joint Surg Br* 1993; 75(4): 529–533, <https://doi.org/10.1302/0301-620x.75b4.8331104>.

23. Germon T., Singleton W., Hobart J. Is NICE guidance for identifying lumbar nerve root compression misguided? *Eur Spine J* 2014; 23(S1): 20–24, <https://doi.org/10.1007/s00586-014-3233-y>.

24. Lane J.I., Koeller K.K., Atkinson J.L. Contrast-enhanced radicular veins on MR of the lumbar spine in an asymptomatic study group. *AJNR Am J Neuroradiol* 1995; 16(2): 269–273.

25. Boden S.D., Davis D.O., Dina T.S., Parker C.P., O'Malley S., Sunner J.L., Wiesel S.W. Contrast-enhanced MR imaging performed after successful lumbar disk surgery: prospective study. *Radiology* 1992; 182(1): 59–64, <https://doi.org/10.1148/radiology.182.1.1727310>.

26. Park C.-K., Lee H.-J., Ryu K.-S. Comparison of root images between post-myelographic computed tomography and magnetic resonance imaging in patients with lumbar radiculopathy. *Journal of Korean Neurosurgical Society* 2017; 60(5): 540–549, <https://doi.org/10.3340/jkns.2016.0809.008>.

27. Al-Tameemi H.N., Al-Essawi S., Shukri M., Naji F.K. Using magnetic resonance myelography to improve interobserver agreement in the evaluation of lumbar spinal canal stenosis and root compression. *Asian Spine J* 2017; 11(2): 198–203, <https://doi.org/10.4184/asj.2017.11.2.198>.

28. Baliyan V., Das C.J., Sharma R., Gupta A.K. Diffusion weighted imaging: technique and applications. *World J Radiol* 2016; 8(9): 785–798, <https://doi.org/10.4329/wjr.v8.i9.785>.

29. Ding W.Q., Gu J.H., Yuan Y., Jin D.S. Stereoscopic display of the peripheral nerves at the elbow region based on MR diffusion tensor imaging with multiple post-processing methods. *Iran J Radiol* 2016; 13(1): e22144, <https://doi.org/10.5812/iranjradiol.22144>.