

## Диффузионно-взвешенная магнитно-резонансная томография в диагностике дегенерации межпозвоноковых дисков пояснично-крестцового отдела позвоночника

**В.А. Бывальцев**<sup>1, 2, 3, 4</sup>, д. м. н., заведующий курсом нейрохирургии ИГМУ, руководитель Центра нейрохирургии ДКБ, заведующий научно-клиническим отделом нейрохирургии ИНЦХТ, профессор кафедры травматологии, ортопедии и нейрохирургии ИГМАПО;

**И.А. Степанов**<sup>1</sup>, аспирант;

**А.А. Калинин**<sup>1, 2</sup>, к. м. н., ассистент курса нейрохирургии ИГМУ, врач-нейрохирург Центра нейрохирургии ДКБ;

**Е.Г. Белых**<sup>3</sup>, аспирант

<sup>1</sup> ГБОУ ВПО «Иркутский государственный медицинский университет» Минздрава России, ул. Красного Восстания, 1, Иркутск, 664003, Российская Федерация;

<sup>2</sup> НУЗ «Дорожная клиническая больница на ст. «Иркутск-Пассажирский»» ОАО «РЖД», ул. Боткина, 10, Иркутск, 664005, Российская Федерация;

<sup>3</sup> ФГБНУ «Иркутский научный центр хирургии и травматологии», ул. Борцов Революции, 1, Иркутск, 664003, Российская Федерация;

<sup>4</sup> ГБОУ ДПО «Иркутская государственная медицинская академия последипломного образования» Министерства здравоохранения РФ, мкр Юбилейный, 100, Иркутск, 664049, Российская Федерация

## Diffusion-weighted magnetic resonance imaging in the diagnosis of intervertebral disc degeneration in the lumbosacral spine

**V.A. Byval'tsev**<sup>1, 2, 3, 4</sup>, MD, PhD, DSc, Head of the Neurosurgery Course of the ISMU, Head of Neurosurgery Center of RCH, Head of Scientific and Clinical Department of Neurosurgery of ISCST, Professor of Department of Traumatology, Orthopedics and Neurosurgery of ISMAPE;

**I.A. Stepanov**<sup>1</sup>, Postgraduate;

**A.A. Kalinin**<sup>1, 2</sup>, MD, PhD, Assistant of Neurosurgery Course of ISMU, Neurosurgeon of Neurosurgery Center of RCH;

**E.G. Belykh**<sup>3</sup>, Postgraduate

<sup>1</sup> Irkutsk State Medical University, Ministry of Health of the Russia, ul. Krasnogo Vosstaniya, 1, Irkutsk, 664003, Russian Federation;

<sup>2</sup> Railway Clinical Hospital on the station "Irkutsk-Passazhirskiy" of Russian Railways Ltd., ul. Botkina, 10, Irkutsk, 664005, Russian Federation;

<sup>3</sup> Irkutsk Scientific Center of Surgery and Traumatology, ul. Bortsov Revolutsii, 1, Irkutsk, 664003, Russian Federation;

<sup>4</sup> Irkutsk State Medical Academy of Postgraduate Education, Ministry of Health of the RF, mikrorayon Yubileynyy, 100, Irkutsk, 664049, Russian Federation

**Цель исследования** – количественная оценка степени дегенерации межпозвоноковых дисков (МПД) с помощью построения функциональных карт диффузионно-взвешенных изображений (ДВИ) и определение корреляционной зависимости между значениями измеряемого коэффициента диффузии (КД) и изменениями МПД на T1- и T2-взвешенных изображениях.

**Материал и методы.** Исследованы 545 МПД у 109 пациентов, не имеющих в анамнезе болевого синдрома в спине и оперативных вмешательств на позвоночнике. Всем пациентам выполнена МРТ поясничного отдела позвоночника, построены карты ДВИ и определены значения КД.

**Результаты.** Для каждого из пяти МПД определялись статистически значимые различия средних значений КД.

**Objective:** to quantify the degree of degeneration of intervertebral discs (IVDs), by constructing functional diffusion-weighted imaging (DWI) maps, and to determine a correlation between the measured diffusion coefficient (DC) values and IVD changes on T1- and T2-weighted images.

**Material and methods.** 545 IVDs were examined in 109 patients with no history of back pain syndrome and surgical spinal interventions. All the patients underwent magnetic resonance imaging of the lumbar spine; DWI maps were constructed and DC values estimated.

**Results.** Statistically significant differences in the mean values of DC were determined for each of five IVDs. Multiple regression analysis showed that age and degree of degeneration were the most significant factors. The degree of IVD degeneration was

Результаты множественного регрессионного анализа показали, что возраст и степень дегенерации являются наиболее значимыми факторами. Степень дегенерации МПД отрицательно коррелирует со значениями КД на всех уровнях ( $p < 0,001$ ). Также имеет место отрицательная корреляционная зависимость между возрастом и значением КД на всех уровнях ( $p < 0,001$ ). Однако пол не влияет на значение КД ( $p > 0,05$ ), за исключением уровня L<sub>III-IV</sub>.

**Заключение.** Возраст и степень дегенеративных изменений МПД влияют на значение КД. Значения КД отрицательно коррелируют со степенью дегенерации МПД по Pfirrmann и возрастом исследованных пациентов. Режим ДВИ МРТ может быть использован в качестве перспективного неинвазивного метода диагностики ранних стадий дегенерации МПД.

**Ключевые слова:** диффузионно-взвешенная магнитно-резонансная томография; дегенерация межпозвонкового диска; коэффициент диффузии; карта диффузионно-взвешенных изображений.

**Для цитирования:** Бывальцев В.А., Степанов И.А., Калинин А.А., Бельх Е.Г. Диффузионно-взвешенная магнитно-резонансная томография в диагностике дегенерации межпозвонковых дисков пояснично-крестцового отдела позвоночника. *Вестник рентгенологии и радиологии*. 2016; 97 (6): 357–64. DOI: 10.20862/0042-4676-2016-97-6-357-364

**Для корреспонденции:** Бывальцев Вадим Анатольевич; E-mail: byval75vadim@yandex.ru

## Введение

Дегенеративные изменения в межпозвонковых дисках (МПД) являются одной из основных причин боли в спине, которую испытывает более 85% людей старше 35 лет [1, 2]. Зачастую боль в спине ассоциирована с ранней утратой трудоспособности населения, что представляет собой глобальную медико-социальную проблему [3–5]. Несмотря на значительные успехи в изучении данной проблемы, до сих пор отсутствуют методы неинвазивной диагностики ранних морфологических стадий дегенерации МПД. Магнитно-резонансная томография (МРТ), обладая высокой степенью чувствительности к содержанию воды в тканях, стала простым и доступным методом диагностики дегенеративных изменений МПД [6]. В настоящее время диагностика степени дегенерации МПД основана на получении рутинных T2-взвешенных изображений с подавлением сигнала от окружающей жировой ткани. К сожалению, данная методика имеет ряд

ограничений, которые не позволяют оценить состояние пульпозного ядра и фиброзного кольца МПД на ранних стадиях их дегенерации [6, 7].

С усовершенствованием методики МРТ появилась возможность количественной оценки степени дегенеративных изменений МПД. Диффузионно-взвешенная (ДВ) МРТ позволяет исследовать состояние ткани МПД путем мониторинга движения свободных молекул воды на клеточном уровне. При этом степень диффузии молекул воды можно оценить с помощью количественной характеристики, в виде измеряемого коэффициента диффузии (КД). Множество значений КД для данной биологической структуры представляет собой функциональную карту диффузионно-взвешенных изображений (ДВИ). Карта ДВИ позволяет выявить минимальные изменения ткани, которые не обнаруживаются на рутинных T1- или T2-взвешенных изображениях МРТ [8–10].

Целью нашего исследования явилась количественная оценка

negatively correlated with the values of DC at all levels ( $p < 0.001$ ). Also, there was a negative correlation between age and the value of DC at all levels ( $p < 0.001$ ). However, gender did not affect the value of DC ( $p > 0.05$ ), with the exception of L3-4.

**Conclusion.** Age and the degree of degenerative changes in IVDs affect the value of DC. The value of DC is negatively correlated with the IVD degeneration graded by Pfirrmann and with the age of the examined patients. DW MRI can be used as a promising noninvasive method to diagnose the early stages of IVD degeneration.

**Index terms:** diffusion-weighted magnetic resonance imaging; intervertebral disc degeneration; diffusion coefficient; diffusion-weighted images.

**For citation:** Byval'tsev 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 (Russian Journal of Radiology)*. 2016; 97 (6): 357–64 (in Russ.). DOI: 10.20862/0042-4676-2016-97-6-357-364

**For correspondence:** Vadim A. Byval'tsev; E-mail: byval75vadim@yandex.ru

### Information about authors:

Byval'tsev V.A., <http://orcid.org/0000-0003-4349-7101>

Stepanov I.A., <http://orcid.org/0000-0001-9039-9147>

Kalinin A.A., <http://orcid.org/0000-0001-8558-0451>

Belykh E.G., <http://orcid.org/0000-0003-2060-5739>

**Acknowledgements.** The study was supported by Grant of the Russian scientific Fund (№ 15–15–30037).

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

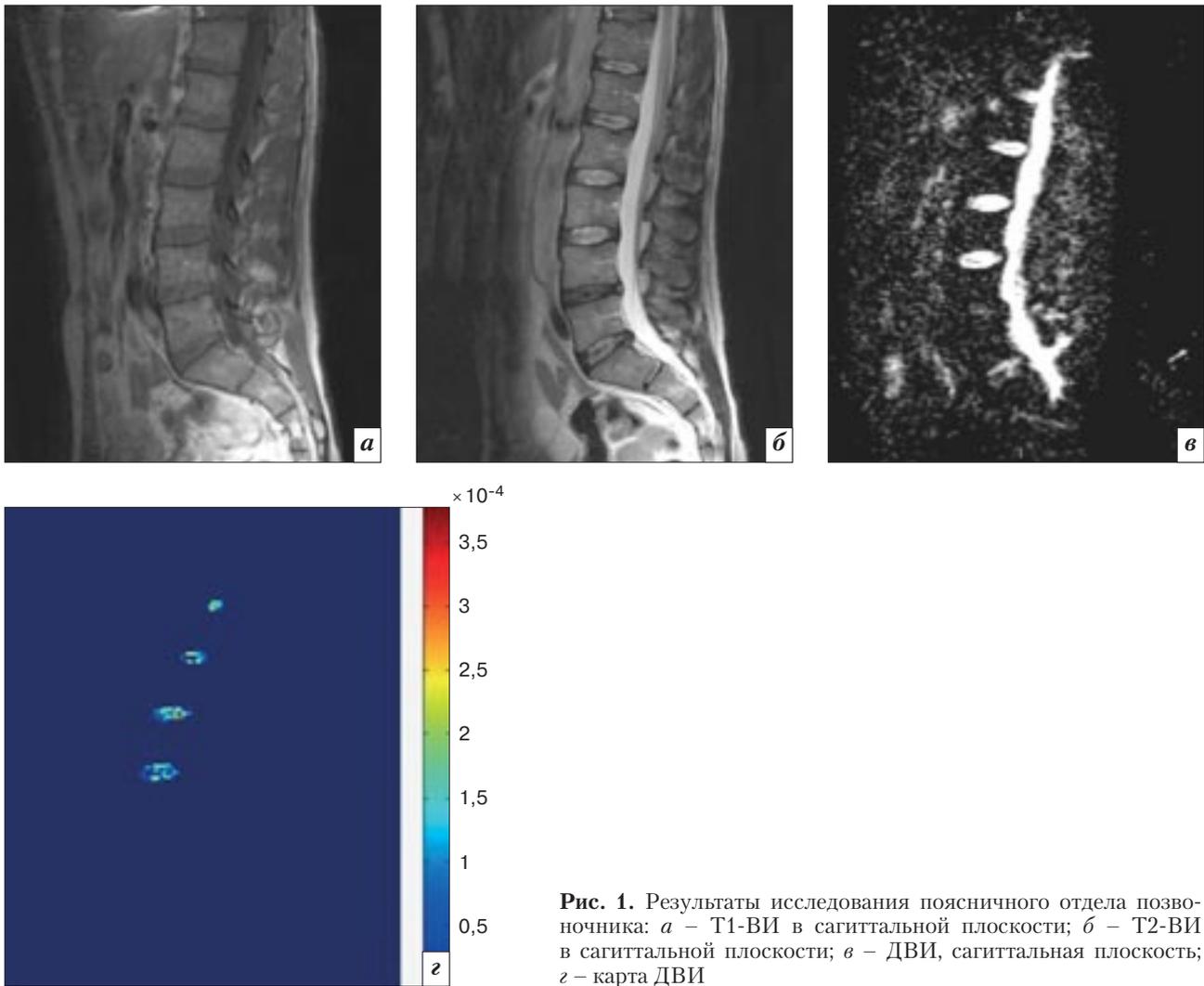
Received 22 May 2016

Accepted 16 June 2016

степени дегенерации МПД с помощью построения функциональных карт ДВИ и определение корреляционной зависимости между значениями КД и изменениями МПД на T1- и T2-взвешенных изображениях.

## Материал и методы

В исследование включены 109 пациентов (60 женщин и 49 мужчин, средний возраст  $39,3 \pm 12,18$  года), не имеющих в анамнезе болевого синдрома в спине и оперативных вмешательств на позвоночнике. Всем пациентам выполнена МРТ поясничного отдела позвоночника на базе Центра нейрохирургии ДКБ на ст. «Иркутск-Пассажирский». С помощью ДВ МРТ были определены значения КД для 545 МПД поясничного отдела позвоночника. От всех участников исследования получено письменное информированное согласие. Протокол исследования одобрен этическим комитетом Иркутского НЦХТ и соответствует основным положениям Хельсинкской декларации [11].



**Рис. 1.** Результаты исследования поясничного отдела позвоночника: *a* – T1-ВИ в сагиттальной плоскости; *б* – T2-ВИ в сагиттальной плоскости; *в* – ДВИ, сагиттальная плоскость; *г* – карта ДВИ

Данные получены с помощью аппарата MRT Siemens Magnetom Essenza 1,5 T. При исследовании в T1-взвешенном режиме (рис. 1, *a*) использовались следующие параметры: матрица  $384 \times 387$ , TR (время повторения) 650, TE (время эхо) 9,6, NEX (число возбуждений) 1, толщина среза 4 мм, FOV (поле зрения)  $30 \times 30$ . Для T2-взвешенных изображений (рис. 1, *б*): матрица  $384 \times 288$ , TR 4000, TE 43, NEX 1, толщина среза 4 мм, FOV  $30 \times 30$ . Для получения ДВИ (рис. 1, *в*) был применен следующий набор параметров опции ДВ MRT с SE-эхопланарным изображением (EPI): матрица  $160 \times 128$ , TR 7500, TE 83, NEX 6, толщина среза 4 мм, FOV  $30 \times 30$ . Использованы значения  $b$  400 и  $800 \text{ с/мм}^2$ , время сканирования составило

6 мин 30 с. КД вычислялся на функциональных картах ДВИ с помощью программы Matlab 2009 (рис. 1, *г*). При оценке степени дегенеративных изменений МПД по данным рутинных T2-взвешенных изображений применялась оригинальная классификация С.В. Pffirrmann et al. [12].

Полученные значения КД для всех пяти МПД поясничного отдела позвоночника были проанализированы с помощью дисперсионного анализа и теста Стьюдента–Ньюмана–Кейлса. Коэффициент корреляции Пирсона использовался для оценки зависимости между возрастом и значением КД. Для оценки корреляционной зависимости между степенью дегенерации МПД по Pffirrmann и значениями КД был использован коэффициент

Спирмена. Т-тест для двух независимых выборок проведен с целью изучения существенных различий значений КД между пациентами разного пола. Для исследования влияния пола, возраста и степени дегенерации МПД на значения КД применялся множественный линейный регрессионный анализ. Статистическую обработку данных проводили с помощью программного обеспечения Microsoft Excel 2010. Порог значимости  $p$  был выбран равным 0,05.

### Результаты

Все пациенты разделены на возрастные группы следующим образом: 32 (29,4%) пациента – группа 20–29 лет, 23 (21,1%) – группа 30–39 лет, 24 (22%) – группа 40–49 лет, 30 (27,5%) – группа 50–59 лет.

Соотношение количества дегенерированных МПД по классификации Pfirrmann в различных возрастных группах

Пол	Возрастная группа	I ст.	II ст.	III ст.	IV ст.	V ст.
Мужской	20–29	14	36	15	5	0
	30–39	4	18	14	13	1
	40–49	9	16	15	18	2
	50–59	2	8	20	35	0
Женский	20–29	12	31	23	12	0
	30–39	17	17	19	15	1
	40–49	7	10	16	23	0
	50–59	1	8	26	56	6

Таблица 2

Значения КД поясничных МПД на различных уровнях

Уровень МПД	Значение КД (среднее $\pm$ SD), $\times 10^{-4}$ мм <sup>2</sup> /с
L <sub>I</sub> -L <sub>II</sub>	16,2 $\pm$ 1,5
L <sub>II</sub> -L <sub>III</sub>	15,1 $\pm$ 1,7
L <sub>III</sub> -L <sub>IV</sub>	14,9 $\pm$ 1,4
L <sub>IV</sub> -L <sub>V</sub>	14,3 $\pm$ 1,5
L <sub>V</sub> -S <sub>I</sub>	13,8 $\pm$ 1,3

В общей сложности у 109 пациентов исследовано 545 МПД пояснично-крестцового отдела позвоночника. Во всех возрастных группах изменения МПД оценивались по классификации Pfirrmann (табл. 1). Для пациентов обоего пола характерно преобладание дегенеративных изменений МПД преимущественно I–IV ст. Во всех группах, за исключением мужчин 20–29 лет и 50–59 лет, а также женщин 20–29 лет и 40–49 лет, обнаружены изменения МПД V ст. I–IV ст. дегенеративных изменений МПД отмечалась во всех возрастных группах, количество дисков с изменениями I–II ст. уменьшалось с возрастом, в то время как количество МПД с изменениями III–IV ст. с возрастом увеличивалось. У мужчин наибольшее количество МПД II ст. дегенерации (51,4%) наблюдалось в возрастной группе 20–29 лет, а IV ст. (53,8%) – в группе 50–59 лет. Аналогичное распределение отмечено и у лиц женского пола – 39,7% и 57,7% соответственно.

Средние значения КД всех МПД поясничного отдела позвоночника представлены в таблице 2. Для каждого из пяти МПД определялись статистически значимые различия средних значений КД ( $p < 0,001$ ). При этом отмечается следующая зависимость: каудально расположенные МПД имеют меньшие КД в отличие от краниально расположенных. Последующее сравнение значений КД на всех уровнях поясничного отдела позвоночника проводилось с помощью теста Стьюдента–Ньюмана–Кейлса.

Нами не было получено существенных различий между значениями КД L<sub>I</sub>, L<sub>II</sub> и L<sub>III</sub>. Также не отмечено значимых различий между значениями КД L<sub>IV</sub> и L<sub>V</sub>. Тем не менее в результате сравнения среднего значения КД верхних поясничных МПД (L<sub>I</sub>-L<sub>II</sub>, L<sub>II</sub>-L<sub>III</sub>, L<sub>III</sub>-L<sub>IV</sub>) со средним значением нижних поясничных МПД (L<sub>IV</sub>-L<sub>V</sub>, L<sub>V</sub>-S<sub>I</sub>) нами получены достоверные различия.

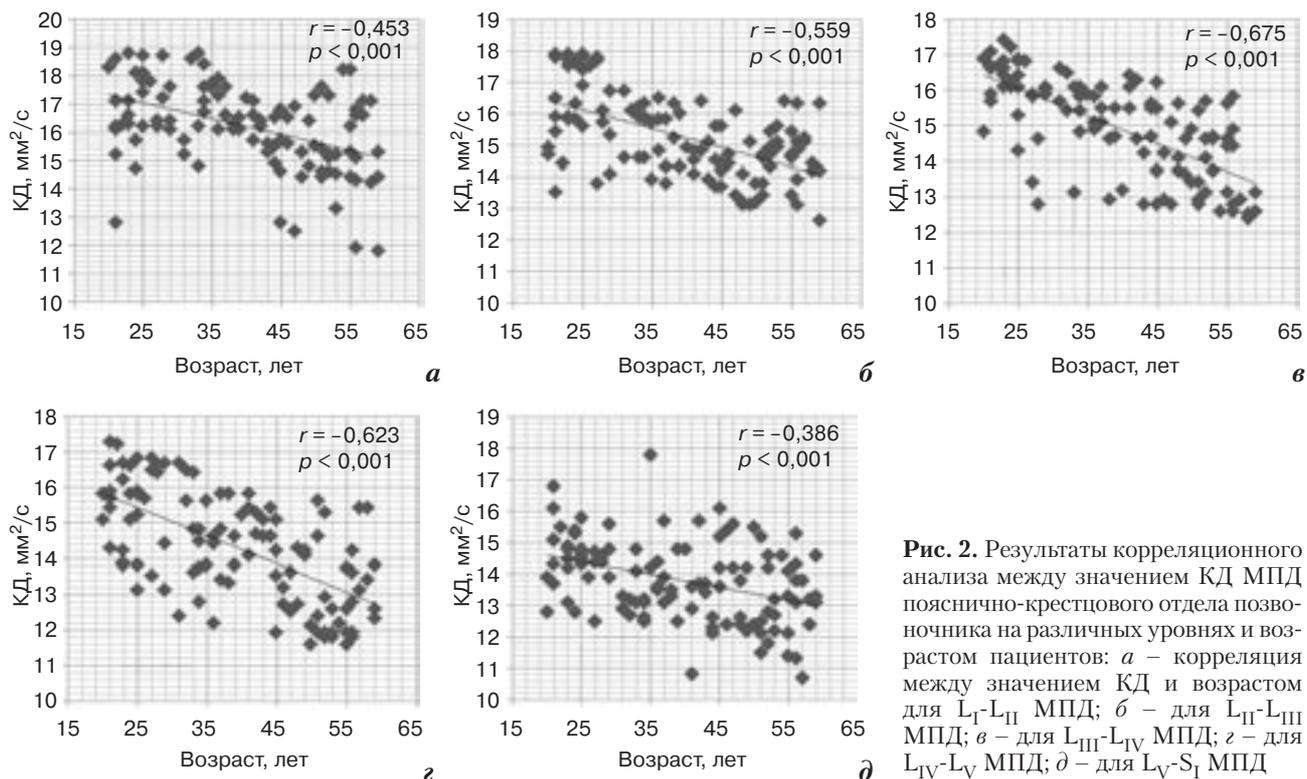
Анализ корреляционной зависимости между возрастом и значением КД (рис. 2) показал выраженную отрицательную зависимость на всех уровнях (коэффициент корреляции Пирсона составил  $-0,453$ ,  $-0,559$ ,  $-0,675$ ,  $-0,623$  и  $-0,386$  для L<sub>I</sub>-L<sub>II</sub>, L<sub>II</sub>-L<sub>III</sub>, L<sub>III</sub>-L<sub>IV</sub>, L<sub>IV</sub>-L<sub>V</sub> и L<sub>V</sub>-S<sub>I</sub> соответственно,  $p < 0,001$ ). При анализе корреляционной зависимости между степенью дегенеративных изменений МПД и значением КД (рис. 3) отмечается отрицательная зависимость на всех уровнях (коэффициент корреляции Спирмена составил  $-0,378$ ,  $-0,524$ ,  $-0,557$ ,  $-0,589$  и  $-0,603$  для L<sub>I</sub>-L<sub>II</sub>, L<sub>II</sub>-L<sub>III</sub>, L<sub>III</sub>-L<sub>IV</sub>, L<sub>IV</sub>-L<sub>V</sub> и L<sub>V</sub>-S<sub>I</sub> соответственно,  $p < 0,001$ ). При сравнении двух независимых выборок статистически значимых различий между мужчинами и женщинами не выявлено (t-тест,  $p > 0,05$ ).

В ходе множественного регрессионного анализа в качестве независимых переменных были выбраны пол, возраст и степень дегенеративных изменений МПД по Pfirrmann, в качестве зависимой переменной – значение КД. Результаты анализа показали,

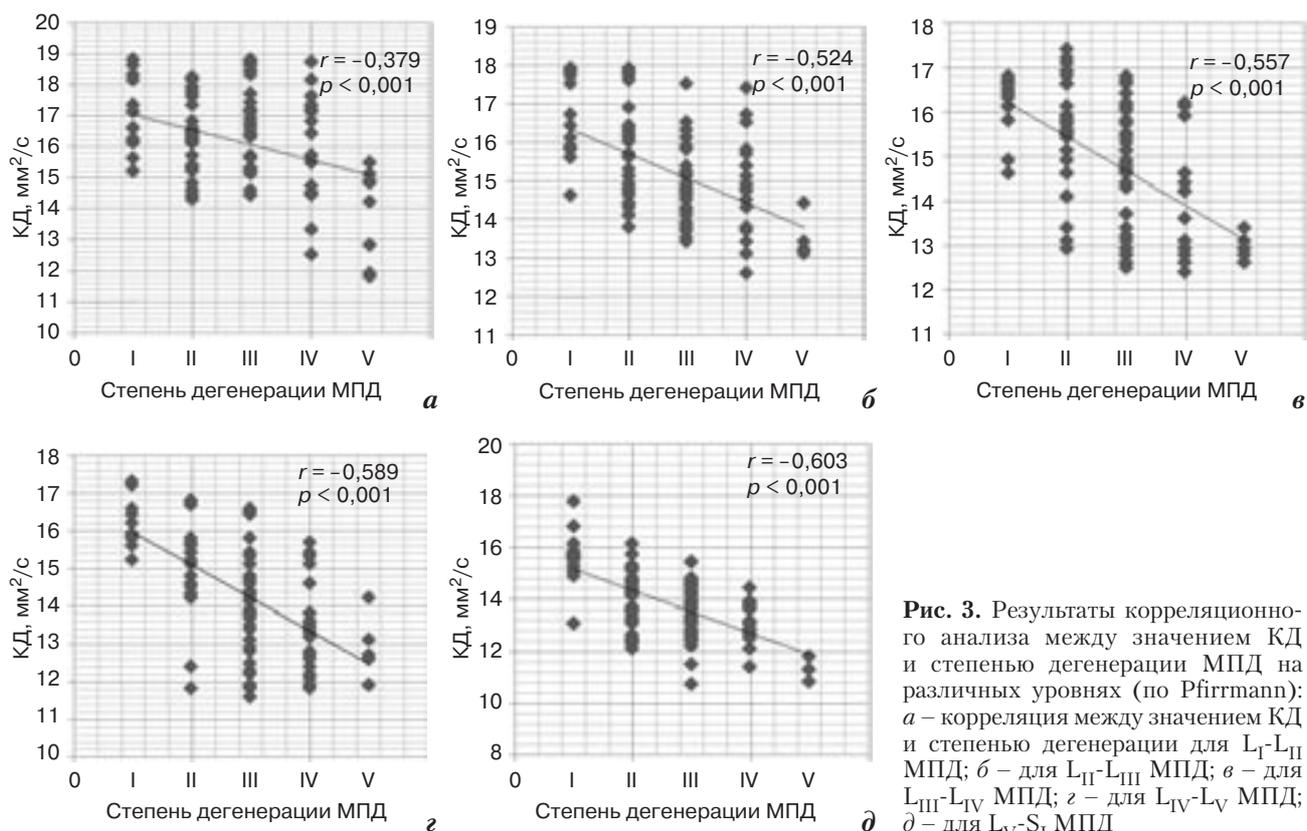
что возраст и степень дегенерации являются наиболее значимыми факторами, влияющими на значение КД. Степень дегенерации МПД отрицательно коррелирует со значениями КД на всех уровнях ( $p < 0,05$ ). Также имеет место отрицательная корреляционная зависимость между возрастом и значением КД на всех уровнях ( $p < 0,05$ ). При этом пол не влияет на значение КД ( $p > 0,05$ ), за исключением уровня L<sub>III</sub>-L<sub>IV</sub>.

### Обсуждение

Для каждого межпозвоночного диска поясничного отдела позвоночника определены степень его дегенеративных изменений по классификации Pfirrmann и значение КД, а также проведен корреляционный анализ между данными показателями. Полученные нами результаты показывают, что для всех МПД поясничного отдела позвоночника характерна отрицательная корреляционная зависимость между степенью дегенерации и значением КД, при этом значения КД могут варьировать в широких пределах в зависимости от выражен-



**Рис. 2.** Результаты корреляционного анализа между значением КД МПД пояснично-крестцового отдела позвоночника на различных уровнях и возрастом пациентов: *а* – корреляция между значением КД и возрастом для L<sub>I</sub>-L<sub>II</sub> МПД; *б* – для L<sub>II</sub>-L<sub>III</sub> МПД; *в* – для L<sub>III</sub>-L<sub>IV</sub> МПД; *г* – для L<sub>IV</sub>-L<sub>V</sub> МПД; *д* – для L<sub>V</sub>-S<sub>I</sub> МПД



**Рис. 3.** Результаты корреляционного анализа между значением КД и степенью дегенерации МПД на различных уровнях (по Pfirrmann): *а* – корреляция между значением КД и степенью дегенерации для L<sub>I</sub>-L<sub>II</sub> МПД; *б* – для L<sub>II</sub>-L<sub>III</sub> МПД; *в* – для L<sub>III</sub>-L<sub>IV</sub> МПД; *г* – для L<sub>IV</sub>-L<sub>V</sub> МПД; *д* – для L<sub>V</sub>-S<sub>I</sub> МПД

ности дегенеративных изменений. Так, наибольшее влияние на значение КД отмечается при дегенеративных изменениях каудально расположенных МПД

(L<sub>IV</sub>-L<sub>V</sub>, L<sub>V</sub>-S<sub>I</sub>). Данные результаты согласуются с исследованием S.M. Kealey et al. [9], которые показали, что для МПД L<sub>V</sub>-S<sub>I</sub> характерно более раннее развитие

дегенерации, которая обусловлена значительной биомеханической нагрузкой на данном уровне позвоночника [13]. Осевые механические воздействия на МПД

способствуют дегидратации его структур и, как следствие, уменьшаются значения КД [14]. Кроме того, при воздействии больших нагрузок на МПД его клетки начинают активно выделять провоспалительные цитокины, матриксные металлопротеиназы и агреканы [14]. Данные вещества и ферменты способствуют активации воспаления и последующей дегидратации межклеточного вещества пульпозного ядра, главным образом агрекана (гидрофильного гликозаминогликана) [15]. Снижение уровня агрекана в пульпозном ядре приводит к его дегидратации и запускает процессы дегенерации МПД [15].

Коэффициент диффузии активно отражает микроокружение для диффундирующих молекул жидкости и зависит главным образом от перфузии тканей и движения молекул воды внеклеточного вещества [16]. Доказано, что снижение значения КД на начальных стадиях дегенерации МПД связано с уменьшением содержания внеклеточных полисахаридов и свободных молекул воды в пульпозном ядре и фиброзном кольце [17]. Исследования показывают, что выраженное снижение КД ассоциировано с нарушением целостности структур МПД [18]. В связи с чем можно с уверенностью сказать, что определение значения КД является перспективным методом диагностики ранних этапов дегенеративных изменений МПД.

При оценке зависимости возраста и значения КД установлена отрицательная корреляция этих параметров для всех МПД пояснично-крестцового отдела позвоночника, при этом наиболее значимая корреляция выявлена для МПД L<sub>III</sub>-L<sub>IV</sub>, L<sub>IV</sub>-L<sub>V</sub>. С возрастом МПД подвергается мультифакторным биохимическим и морфологическим изменениям. Как известно, МПД представляет собой аваскулярную ткань с многочисленными клетками, окруженными межклеточным веще-

ством. Фиброзное кольцо и пульпозное ядро находятся в тесной анатомо-физиологической связи друг с другом. Пока фиброзное кольцо способно сохранять свою полноценную структуру, центральная часть пульпозного ядра интактна и богата протеогликанами. С течением времени количество протеогликана в пульпозном ядре уменьшается, что является одним из ключевых факторов патогенеза дегенерации МПД [19].

На сегодняшний день существует несколько исследований, в которых показана зависимость между возрастом и дегенерацией МПД [20]. Первые изменения МПД появляются в начале второго десятилетия жизни человека и неуклонно прогрессируют. Снижение перфузии ткани МПД приводит к дистрофии и некрозу его клеток [20]. В то же время клетки пульпозного ядра способны к пролиферации и восстановлению межклеточного матрикса [21]. Немаловажное значение в дегенерации МПД играет состояние замыкательных пластинок. Показано, что дегенеративные процессы замыкательной пластинки начинаются в области ее непосредственного контакта с пульпозным ядром, что приводит к нарушению равновесия между диффузией питательных веществ и оттоком продуктов метаболизма. Следствием этого являются дистрофия, некротические изменения клеток пульпозного ядра, а также накопление в нем продуктов обмена с последующей деструкцией [22].

Роль пола в дегенерации МПД противоречива. Некоторые исследования показывают, что мужчины молодого возраста более подвержены дегенеративным изменениям МПД в отличие от женщин схожего возраста. Скорее всего, это связано с большей физической и эмоциональной нагрузкой у мужчин [23, 24]. В другом исследовании, проведенном на трупном материале (600 МПД), наглядно продемон-

стрировано, что в группе мужчин достоверно чаще встречались дегенерированные МПД [24].

Безусловно, данное исследование не лишено недостатков. К примеру, нами не были использованы другие методы верификации дегенеративных изменений МПД, такие как гистологическое и биохимическое исследования. Среди факторов, влияющих на дегенерацию, не учитывались индекс массы тела, физические нагрузки, наличие соматической патологии и т. д.

### Заключение

Проведенное исследование показало, что возраст и степень дегенеративных изменений МПД влияют на значение КД. Значения КД отрицательно коррелируют со степенью дегенерации МПД по Pfitzmann на всех уровнях поясничного отдела позвоночника, а также с возрастом пациентов. ДВ МРТ может быть использована в качестве перспективного неинвазивного метода диагностики ранних стадий дегенерации МПД.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### Финансирование

Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 15-15-30037).

### Литература

1. An H.S., Anderson P.A., Haughton V.M., Iatridis J.C., Kang J.D., Lotz J.C. et al. (2004) Introduction: disc degeneration: summary. *Spine*. 2010; 29 (23): 2677–8.
2. Smith L.J., Kurmis A.P., Slavotinek J.P., Fazzalari N.L. In vitro evaluation of a manganese chloride phantom-based MRI technique for quantitative determination of lumbar intervertebral disc composition and condition. *Eur. Spine J.* 2011; 20 (3): 434–9.
3. Kettler A., Wilke H. Review of existing grading systems for cervi-

- cal or lumbar disc and facet joint degeneration. *Eur. Spine J.* 2006; 15 (6): 705–18.
4. Theilmann R.J., Borders R., Trouard T.P., Xia G., Outwater E., Ranger-Moore J. et al. Changes in water mobility measured by diffusion MRI predict response of metastatic breast cancer to chemotherapy. *Neoplasia.* 2012; 6 (6): 831–7.
  5. Ohgiya Y., Oka M., Hiwatashi A., Liu X., Kakimoto N., Westesson P.A. et al. Diffusion tensor MR imaging of the cervical spinal cord in patients with multiple sclerosis. *Eur. Radiol.* 2010; 17 (10): 2499–504.
  6. Khalil C., Hancart C., Le Thuc V., Chantelot C., Chechin D., Cotton A. Diffusion tensor imaging and tractography of the median nerve in carpal tunnel syndrome: preliminary results. *Eur. Radiol.* 2013; 18 (10): 2283–91.
  7. Antoniou J., Demers C.N., Beaudoin G., Goswami T., Mwale F., Aebi M. et al. Apparent diffusion coefficient of intervertebral discs related to matrix composition and integrity. *Magn. Reson. Imaging.* 2014; 22 (7): 963–72.
  8. Beattie P.F., Morgan P.S., Peters D. Diffusion-weighted magnetic resonance imaging of normal and degenerative lumbar intervertebral discs: a new method to potentially quantify the physiologic effect of physical therapy intervention. *J. Orthop. Sports. Phys. Ther.* 2010; 38 (2): 42–9.
  9. Kealey S.M., Aho T., Delong D., Barboriak D.P., Provenzale J.M., Eastwood J.D. Assessment of apparent diffusion coefficient in normal and degenerated intervertebral lumbar disks: initial experience. *Radiology.* 2015; 235 (2): 569–74.
  10. Niinimäki J., Korhikoski A., Ojala O., Karppinen J., Ruohonen J., Haapea M. et al. Association between visual degeneration of intervertebral discs and the apparent diffusion coefficient. *Magn. Reson. Imaging.* 2009; 27 (5): 641–7.
  11. Williams J.R. The Declaration of Helsinki and public health. *Bull. World Health Organ.* 2008; 86 (8): 650–2.
  12. Pfirrmann C.W., Metzdorf A., Zanetti M., Hodler J., Boos N. Magnetic resonance classification of lumbar intervertebral disc degeneration. *Spine.* 2001; 26 (17): 1873–8.
  13. Siemionow K., An H., Masuda K., Andersson G., Cs-Szabo G. The Effects of age, gender, ethnicity, and spinal level on the rate of intervertebral disc degeneration. A review of 1712 intervertebral discs. *Spine.* 2011; 36 (17): 1333–9.
  14. Бардонова Л.А., Белых Е.Г., Степанов И.А., Бывальцев В.А. Роль матричных металлопротеиназ и провоспалительных цитокинов в регенерации межпозвонкового диска. *Тихоокеанский медицинский журнал.* 2015; 4: 21–6.
  15. Keller T.S., Colloca C.J., Harrison D.E., Harrison D.D., Janik T.J. Influence of spine morphology on intervertebral disc loads and stresses in asymptomatic adults: implications for the ideal spine. *Spine J.* 2013; 5 (3): 297–309.
  16. Belykh E., Giers M., Bardonova L., Theodore N., Preul M., Byvaltsev V. The role of bone morphogenetic proteins 2, 7, and 14 in approaches for intervertebral disk restoration. *World Neurosurg.* 2015; 84 (4): 870–7.
  17. Anderson D.G., Tannoury C. Molecular pathogenic factors in symptomatic disc degeneration. *Spine J.* 2011; 4: 260–6.
  18. Roughley P.J. Biology of intervertebral disc aging and degeneration: involvement of the extracellular matrix. *Spine.* 2009; 29 (23): 2691–9.
  19. Бывальцев В.А., Белых Е.Г., Степанов И.А., Гиерс М., Прул М. Цитокиновые механизмы дегенерации межпозвонкового диска. *Сибирский медицинский журнал (Иркутск).* 2015; 6: 5–11.
  20. Takatalo J., Karppinen J., Niinimäki J., Taimela S., Mutanen P., Sequeiros R.B. et al. Association of modic changes, Schmorl's nodes, spondylytic defects, high-intensity zone lesions, disc herniations, and radial tears with low back symptom severity among young Finnish adults. *Spine.* 2012; 37 (14): 1231–9.
  21. Wang Y.X., Griffith J.F. Effect of menopause on lumbar disc degeneration: potential etiology. *Radiology.* 2012; 257 (2): 318–20.
  22. Kim K.W., Chung H.N., Ha K.Y., Lee J.S., Kim Y.Y. Senescence mechanisms of nucleus pulposus chondrocytes in human intervertebral discs. *Spine J.* 2009; 9 (8): 658–66.
  23. Rodriguez A.G., Slichter C.K., Acosta F.L., Rodriguez-Soto A.E., Burghardt A.J., Majumdar S. et al. Human disc nucleus properties and vertebral end-plate permeability. *Spine.* 2011; 36 (7): 512–20.
  24. Rodriguez A.G., Rodriguez-Soto A.E., Burghardt A.J., Berven S., Majumdar S., Lotz J.C. Morphology of the human vertebral end-plate. *J. Orthop. Res.* 2012; 30 (2): 280–7.

## References

1. An H.S., Anderson P.A., Haughton V.M., Iatridis J.C., Kang J.D., Lotz J.C. et al. (2004) Introduction: disc degeneration: summary. *Spine.* 2010; 29 (23): 2677–8.
2. Smith L.J., Kurmis A.P., Slavotinek J.P., Fazzalari N.L. In vitro evaluation of a manganese chloride phantom-based MRI technique for quantitative determination of lumbar intervertebral disc composition and condition. *Eur. Spine J.* 2011; 20 (3): 434–9.
3. Kettler A., Wilke H. Review of existing grading systems for cervical or lumbar disc and facet joint degeneration. *Eur. Spine J.* 2006; 15 (6): 705–18.
4. Theilmann R.J., Borders R., Trouard T.P., Xia G., Outwater E., Ranger-Moore J. et al. Changes in water mobility measured by diffusion MRI predict response of metastatic breast cancer to chemotherapy. *Neoplasia.* 2012; 6 (6): 831–7.
5. Ohgiya Y., Oka M., Hiwatashi A., Liu X., Kakimoto N., Westesson P.A. et al. Diffusion tensor MR imaging of the cervical spinal cord in patients with multiple sclerosis. *Eur. Radiol.* 2010; 17 (10): 2499–504.
6. Khalil C., Hancart C., Le Thuc V., Chantelot C., Chechin D., Cotton A. Diffusion tensor imaging and tractography of the median nerve in carpal tunnel syndrome: preliminary results. *Eur. Radiol.* 2013; 18 (10): 2283–91.
7. Antoniou J., Demers C.N., Beaudoin G., Goswami T., Mwale F., Aebi M. et al. Apparent diffusion coefficient of intervertebral discs related to matrix composition and integrity. *Magn. Reson. Imaging.* 2014; 22 (7): 963–72.
8. Beattie P.F., Morgan P.S., Peters D. Diffusion-weighted magnetic reso-

- nance imaging of normal and degenerative lumbar intervertebral discs: a new method to potentially quantify the physiologic effect of physical therapy intervention. *J. Orthop. Sports. Phys. Ther.* 2010; 38 (2): 42–9.
9. Kealey S.M., Aho T., Delong D., Barboriak D.P., Provenzale J.M., Eastwood J.D. Assessment of apparent diffusion coefficient in normal and degenerated intervertebral lumbar disks: initial experience. *Radiology.* 2015; 235 (2): 569–74.
  10. Niinimäki J., Korhikoski A., Ojala O., Karppinen J., Ruohonen J., Haapea M. et al. Association between visual degeneration of intervertebral discs and the apparent diffusion coefficient. *Magn. Reson. Imaging.* 2009; 27 (5): 641–7.
  11. Williams J.R. The Declaration of Helsinki and public health. *Bull. World Health Organ.* 2008; 86 (8): 650–2.
  12. Pfirrmann C.W., Metzendorf A., Zanetti M., Hodler J., Boos N. Magnetic resonance classification of lumbar intervertebral disc degeneration. *Spine.* 2001; 26 (17): 1873–8.
  13. Siemionow K., An H., Masuda K., Andersson G., Cs-Szabo G. The Effects of age, gender, ethnicity, and spinal level on the rate of intervertebral disc degeneration. A review of 1712 intervertebral discs. *Spine.* 2011; 36 (17): 1333–9.
  14. Bardonova L.A., Belykh E.G., Stepanov I.A., Byval'tsev V.A. Role of matrix metalloproteinases and proinflammatory cytokines in intervertebral disc regeneration. *Tikhookeanskiy Meditsinskiy Zhurnal (Pacific Medical Journal, Russian journal).* 2015; 4: 21–6 (in Russ.).
  15. Keller T.S., Colloca C.J., Harrison D.E., Harrison D.D., Janik T.J. Influence of spine morphology on intervertebral disc loads and stresses in asymptomatic adults: implications for the ideal spine. *Spine J.* 2013; 5 (3): 297–309.
  16. Belykh E., Giers M., Bardonova L., Theodore N., Preul M., Byval'tsev V. The role of bone morphogenetic proteins 2, 7, and 14 in approaches for intervertebral disk restoration. *World Neurosurg.* 2015; 84 (4): 870–7.
  17. Anderson D.G., Tannoury C. Molecular pathogenic factors in symptomatic disc degeneration. *Spine J.* 2011; 4: 260–6.
  18. Roughley P.J. Biology of intervertebral disc aging and degeneration: involvement of the extracellular matrix. *Spine.* 2009; 29 (23): 2691–9.
  19. Byval'tsev V.A., Belykh E.G., Stepanov I.A., Giers M., Prul M. Cytokine's mechanisms of intervertebral disc degeneration. *Sibirskiy Meditsinskiy Zhurnal (Irkutsk) (Siberian Medical Journal (Irkutsk), Russian journal).* 2015; 6: 5–11 (in Russ.).
  20. Takatalo J., Karppinen J., Niinimäki J., Taimela S., Mutanen P., Sequeiros R.B. et al. Association of modic changes, Schmorl's nodes, spondylolytic defects, high-intensity zone lesions, disc herniations, and radial tears with low back symptom severity among young Finnish adults. *Spine.* 2012; 37 (14): 1231–9.
  21. Wang Y.X., Griffith J.F. Effect of menopause on lumbar disc degeneration: potential etiology. *Radiology.* 2012; 257 (2): 318–20.
  22. Kim K.W., Chung H.N., Ha K.Y., Lee J.S., Kim Y.Y. Senescence mechanisms of nucleus pulposus chondrocytes in human intervertebral discs. *Spine J.* 2009; 9 (8): 658–66.
  23. Rodriguez A.G., Slichter C.K., Acosta F.L., Rodriguez-Soto A.E., Burghardt A.J., Majumdar S. et al. Human disc nucleus properties and vertebral end-plate permeability. *Spine.* 2011; 36 (7): 512–20.
  24. Rodriguez A.G., Rodriguez-Soto A.E., Burghardt A.J., Berven S., Majumdar S., Lotz J.C. Morphology of the human vertebral end-plate. *J. Orthop. Res.* 2012; 30 (2): 280–7.

Поступила 22.05.2016  
Принята к печати 16.06.2016