

<https://doi.org/10.57256/2949-0715-2025-4-4-51-60>



ВОЛЮМЕТРИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА МЕЖПОЗВОНКОВЫХ ДИСКОВ – ОСНОВА СТРАТИФИКАЦИИ ДЕГЕНЕРАТИВНОЙ ПАТОЛОГИИ ПОЗВОНОЧНИКА

Ларионов С.Н., Сороковиков В.А., Селивёрстов П.В., Животенко А.П.,
Потапов В.Э., Вельм А.И.

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

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Дегенерация межпозвоночных дисков представляет собой естественный процесс инволюционных изменений, который в ряде случаев протекает ускоренно и интенсивно, приобретая патологический характер, сопровождаясь болевым синдромом и являясь одной из наиболее частых причин нетрудоспособности. Существующие методы визуальной оценки дегенерации межпозвоночных дисков субъективны и зависят от мощности магнитно-резонансного томографа.

Цель исследования: разработать унифицированный количественный метод оценки дегенерации межпозвоночных дисков.

Материалы и методы. Проведено проспективное одноцентровое исследование с участием 20 пациентов (60 дисков) с диагнозом дорсопатия поясничного отдела позвоночника. Выполнялась магнитно-резонансная томография в режиме DWI с расчётом коэффициента дегенерации (X) как отношения измеряемого коэффициента диффузии пульпозного ядра к измеряемому коэффициенту диффузии ликвора.

Результаты. При сопоставлении полученных показателей X – коэффициента дегенерации 60 межпозвоночных дисков с классификацией Pfirrmann дегенерированные диски имели коэффициент X меньше 0,8, а при X больше 0,8 признаков дегенерации не было выявлено. Следовательно, чем ниже значение X , тем более выражена дегенерация. Сравнение полученных величин не выявило прямой корреляции, что обусловлено субъективностью оценки интенсивности сигнала в T2-режиме при магнитно-резонансной томографии.

Заключение. Коэффициент дегенерации X является объективным, воспроизводимым параметром, не зависящим от мощности томографа, и пригоден для стратификации патологии и динамического наблюдения. Предложенный способ позволяет количественно оценить дегенеративные изменения. Полученные результаты подтверждают принципиальную работоспособность и преимущества предложенного коэффициента дегенерации X . Перспективным направлением для его полной валидации и внедрения в клиническую практику являются многоцентровые исследования на расширенной когорте пациентов.

Ключевые слова: магнитно-резонансная томография, межпозвоночный диск, цифровая волюметрия, коэффициент дегенерации межпозвоночного диска

Для цитирования: Ларионов С.Н., Сороковиков В.А., Селивёрстов П.В., Животенко А.П., Потапов В.Э., Вельм А.И. Волюметрическая оценка межпозвоночных дисков – основа стратификации дегенеративной патологии позвоночника. *Байкальский медицинский журнал*. 2025; 4(4): 51-60. <https://doi.org/10.57256/2949-0715-2025-4-4-51-60>

VOLUMETRIC ASSESSMENT OF INTERVERTEBRAL DISCS IS THE BASIS FOR THE STRATIFICATION OF DEGENERATIVE SPINE PATHOLOGY

Sergey N. Larionov, Vladimir A. Sorokovikov, Pavel V. Seliverstov, Aleksandr P. Zhivotenko, Vitaly E. Potapov, Andrey I. Velm

Irkutsk Scientific Centre of Surgery and Traumatology, 664003, Irkutsk, Bortsov Revolyutsii str., 1, Russian Federation

ABSTRACT

Background. Intervertebral disc degeneration is a natural process of involutional changes that, in some cases, progresses rapidly and intensely, becoming pathological and accompanied by pain. It is one of the most common causes of disability. Existing methods for visually assessing intervertebral disc degeneration are subjective and dependent on the power of the magnetic resonance imaging scanner.

The aim. To develop a unified quantitative method for assessing intervertebral disc degeneration.

Materials and methods. A prospective, single-center study was conducted involving 20 patients (60 discs) diagnosed with lumbar dorsopathy. Magnetic resonance imaging was performed in DWI mode with the calculation of the degeneration coefficient (X) as the ratio of the measured diffusion coefficient of the nucleus pulposus to the measured diffusion coefficient of the cerebrospinal fluid.

Results. When comparing the obtained X -factor values for degeneration of 60 intervertebral discs with the Pfirrmann classification, degenerated discs had an X -factor value less than 0.8, while no signs of degeneration were detected with an X -factor value greater than 0.8. Consequently, the lower the X -factor value, the more severe the degeneration. A comparison of the obtained values did not reveal a direct correlation, due to the subjective nature of signal intensity assessment in T2 mode of magnetic resonance imaging.

Conclusions. The X degeneration coefficient is an objective, reproducible parameter independent of tomograph power and suitable for pathology stratification and dynamic monitoring. The proposed method enables quantitative assessment of degenerative changes. The obtained results confirm the fundamental viability and advantages of the proposed degeneration coefficient X . A promising direction for its full validation and implementation in clinical practice is conducting multicenter studies on an expanded cohort of patients.

Key words: *magnetic resonance imaging, intervertebral disc, digital volumetry, intervertebral disc degeneration coefficient*

For citation: Larionov S.N., Sorokovikov V.A., Seliverstov P.V., Zhivotenko A.P., Potapov V.E., Velm A.I. Volumetric assessment of intervertebral discs is the basis for the stratification of degenerative spine pathology. *Baikal Medical Journal*. 2025; 4(4): 51-60. <https://doi.org/10.57256/2949-0715-2025-4-4-51-60>

ВВЕДЕНИЕ

Дегенерация межпозвонковых дисков, или дегенеративно-дистрофические изменения позвоночника, представляет собой естественный инволюционный процесс, характеризующийся прогрессирующим изнашиванием структур диска. В определённых клинических ситуациях данный процесс протекает с ускорением и интенсификацией, приобретая черты патологического состояния, которое манифестирует болевым синдромом, скованностью, ограничением подвижности и выступает одной из ведущих причин утраты трудоспособности [1–6].

Основная физиологическая роль межпозвонковых дисков заключается в поглощении механической энергии, возникающей при осевых нагрузках, скручивании, сгибании и ударных воздействиях на позвоночный столб. Анатомически диск состоит из двух ключевых структур: пульпозного ядра (лат. *nucleus pulposus*) – гелеобразной гидратированной центральной части, состоящей приблизительно на 80 % из воды, и фиброзного кольца (лат. *anulus fibrosus*) – многослойной периферической структуры из коллагеновых волокон, обеспечивающей механическую стабильность [2, 7–9].

Патофизиология дегенерации диска включает ряд взаимосвязанных процессов:

- потерю жидкости и снижение гидратации пульпозного ядра, что приводит к уменьшению его упругости и амортизационной способности;
- формирование микротравм и разрывов фиброзного кольца вследствие хронических нагрузок;
- уменьшение высоты диска, приводящее к снижению межпозвонкового расстояния;
- нарушение биомеханики позвоночно-двигательного сегмента с перераспределением нагрузки на фасеточные суставы и связочный аппарат [10–13].

Клиническая картина часто длительное время остаётся бессимптомной. Манифестация боли связана с вовлечением окружающих структур: формированием протрузий, грыж диска, компенсаторным образованием остеофитов, развитием спондилоартроза, фасет-синдрома и стеноза позвоночного канала [7].

Актуальность проблемы дегенеративных заболеваний позвоночника обусловлена их высокой распространённостью, значительной долей пациентов трудоспособного возраста, ограниченной эффективностью консервативной терапии и рецидивирующим характером боли. Эпизодические дорсалгии отмечаются у 80 % населения, при этом переход в хроническую форму (≥ 3 месяцев) наблюдается в 15–45 % случаев, существенно снижая качество жизни и психоэмоциональный статус пациентов [14–18].

В диагностике дегенеративных изменений применяются следующие методы визуализации:

- рентгенография, позволяющая оценить уменьшение межпозвонкового расстояния, наличие остео-

фитов и нестабильность сегмента, однако не визуализирующая непосредственно диск;

- компьютерная томография, обеспечивающая детальную оценку костных структур и возможность идентификации протрузий и экструзий;

- магнитно-резонансная томография (МРТ), признанная «золотым стандартом» благодаря возможности комплексной оценки костных и мягкотканых структур, состояния диска, нервных корешков и спинного мозга [1, 11–13].

Диффузионно-взвешенная МРТ (ДВИ) представляет собой методику, основанную на оценке диффузии молекул воды, что позволяет количественно охарактеризовать микроструктурные изменения тканей посредством измерения коэффициента диффузии (ИКД). Совокупность значений ИКД формирует параметрическую карту, отражающую диффузионные свойства биологических структур [19, 20].

В клинической практике широко используется семиотическая оценка дегенерации дисков на основе T2-взвешенных изображений, включающая анализ интенсивности МР-сигнала, чёткости границ между пульпозным ядром и фиброзным кольцом, а также высоты диска. Однако данный подход имеет существенные ограничения: субъективность визуальной оценки, зависимость от мощности томографа, а также низкая чувствительность на ранних стадиях дегенерации, когда микроструктурные изменения, выявляемые только на ДВИ, ещё не сопровождаются макроскопическими признаками [11, 19, 20].

Известны методики количественной оценки дегенерации на основе определения ИКД пульпозного ядра в режиме ДВИ. Однако их недостатком является влияние артефакта «сигнал-шум» на результаты измерений, что ограничивает воспроизводимость и сопоставимость данных, полученных на аппаратах МРТ различной конфигурации.

В связи с этим, целью настоящей работы стала разработка унифицированного способа волюметрической оценки дегенерации межпозвонковых дисков, лишённого указанных методологических ограничений.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Нами разработан метод определения дегенерации межпозвонкового диска, включающий проведение магнитно-резонансной томографии позвоночника в сагиттальной плоскости в режиме диффузно-взвешенного изображения и определение измеряемого коэффициента диффузии пульпозного ядра межпозвонкового диска и ликвора, что позволяет нивелировать существующие недостатки известных способов и на основании волюметрии классифицировать стадии дегенерации дисков.

Отличительным приёмом предлагаемого нами способа является дополнительное определение из-

меряемого коэффициента диффузии ликвора в просвете дурального мешка, свободного от невральных структур, определение в сагиттальном и парасагиттальных срезах средних значений измеряемого коэффициента диффузии пульпозного ядра, после чего величину коэффициента дегенерации межпозвонкового диска предлагается вычислять по запатентованной формуле [21].

Определение ИКД ликвора в просвете дурального мешка позволяет повысить точность определения дегенеративных изменений, за счёт того, что ликвор является константной величиной для тканей ДВИ и не зависит от пакетов программ МРТ, аппаратуры и субъективного фактора при оценке стадии дегенерации.

Вычисление средних значений ИКД пульпозного ядра и ликвора обеспечивает повышение точности измерений и снижает вероятность ошибки.

Способ диагностики дегенерации межпозвонковых дисков апробирован в условиях отделения лучевой диагностики Иркутского научного центра хирургии и травматологии в качестве диагностики и определения тактики лечения у пациентов дегенеративными заболеваниями межпозвонковых дисков поясничного отдела позвоночника.

Проведено проспективное одноцентровое исследование с участием 20 пациентов (60 дисков) с диагнозом «дорсопатия поясничного отдела позвоночника» (МКБ 10: M51.1). Критерии включения: хроническая нерадикальная боль или радикулопатия в фазе ирритации на фоне дегенерации диска I–III стадии классификации (по Pfirrmann).

Группу составили 10 мужчин и 10 женщин в возрасте $39 \pm 9,1$ года. Средняя длительность заболевания – $5,5 \pm 2,1$ месяца.

Группы были сопоставимы по антропометрическим показателям, исходной интенсивности боли и неврологическому статусу.

Всем пациентам было проведено МРТ в стандартных последовательностях и режиме ДВИ.

При проведении МРТ поясничного отдела позвоночника, на сагиттальном и парасагиттальных срезах определялись средние значения ИКД пульпозного ядра, дополнительно на сагиттальном срезе определялись ИКД ликвора в просвете дурального мешка, свободного от невральных структур; затем определяли величину коэффициента дегенерации межпозвонкового диска по формуле:

$$X = \text{ИКД}_{\text{ср. диска}} / \text{ИКД}_{\text{ликвора}}$$

где: X – коэффициент дегенерации межпозвонкового диска; $\text{ИКД}_{\text{ср. диска}}$ – средний показатель ИКД пульпозного ядра на сагиттальном и парасагиттальных срезах; $\text{ИКД}_{\text{ликвора}}$ – показатель ИКД ликвора на сагиттальном срезе в просвете дурального мешка, свободного от невральных структур.

При показателе $X < 0,8$ определяли дегенерацию межпозвонкового диска, при этом, чем ниже значение коэффициента X , тем более выражены дегенеративные изменения в диске.

Статистическая обработка полученных результатов проводилась с использованием программы статистика Statistica 10.0 (StatSoft Inc., США). Ввиду отклонения распределения от нормального данные представлены не только в виде среднего значения и стандартного отклонения ($M \pm SD$), но и в виде медианы с 25-м и 75-м перцентилями.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Проведён анализ магнитно-резонансных томограмм как дегенерированных, так и не дегенерированных дисков (рис. 1).

Коэффициент X рассчитывался на уровне позвоночно-двигательных сегментов (ПДС) L_{III}/L_{IV} , L_{IV}/L_V , L_V/S_I (табл. 1).

Межпозвонковые диски L_{III}/L_{IV} и L_{IV}/L_V на Т2-взвешенном изображении имеют чёткое разделение фиброзного кольца и пульпозного ядра, гиперинтенсивный сигнал, нормальную высоту межпозвонкового диска, гомогенную структуру.

Однако после вычисления коэффициента X по предлагаемой формуле установлено, что диск на уровне ПДС L_{III}/L_{IV} имеет меньшее значение, чем диск L_{IV}/L_V . Проанализированное МРТ-исследование показало, что межпозвонковый диск L_{III}/L_{IV} имеет менее гомогенную структуру и поэтому был отнесён к I степени дегенерации по С.В. Pfirrmann. Хотя диски L_{III}/L_{IV} и L_{IV}/L_V визуально не значительно отличаются друг от друга, при этом величина коэффициентов X этих дисков имеет существенную разницу.

Установлено, что чем ниже значение коэффициента X , тем больше выражены дегенеративные изменения в диске.

Рассчитаны среднее значение и медиана X коэффициента дегенерации 60 межпозвонковых дисков у 20 человек для позвоночно-двигательных сегментов L_{III}/L_{IV} , L_{IV}/L_V , L_V/S_I , при этом значения величин коэффициента X варьировали от 0,1 до 0,92. Учитывая цель исследования, нами представлено сравнение межпозвонковых уровней между собой, которое демонстрирует междисковую вариабельность и чувствительность метода (рис. 2).

При сопоставлении полученных показателей X – коэффициента дегенерации 60 межпозвонковых дисков с классификацией С.В. Pfirrmann дегенерированные диски имели коэффициент X меньше 0,8, а при X больше 0,8 признаков дегенерации не было выявлено.

Сравнение полученных величин коэффициентов дегенерации межпозвонковых дисков с классификацией по С.В. Pfirrmann не выявило прямой корреляции, что обусловлено субъективностью оценки интенсивности сигнала, что также продемонстрировано на клиническом примере.

Клинический пример

Пациентка Л., 42 года (24.02.1981 г.р.), в 2023 г. поступила в нейрохирургическое отделение Иркут-

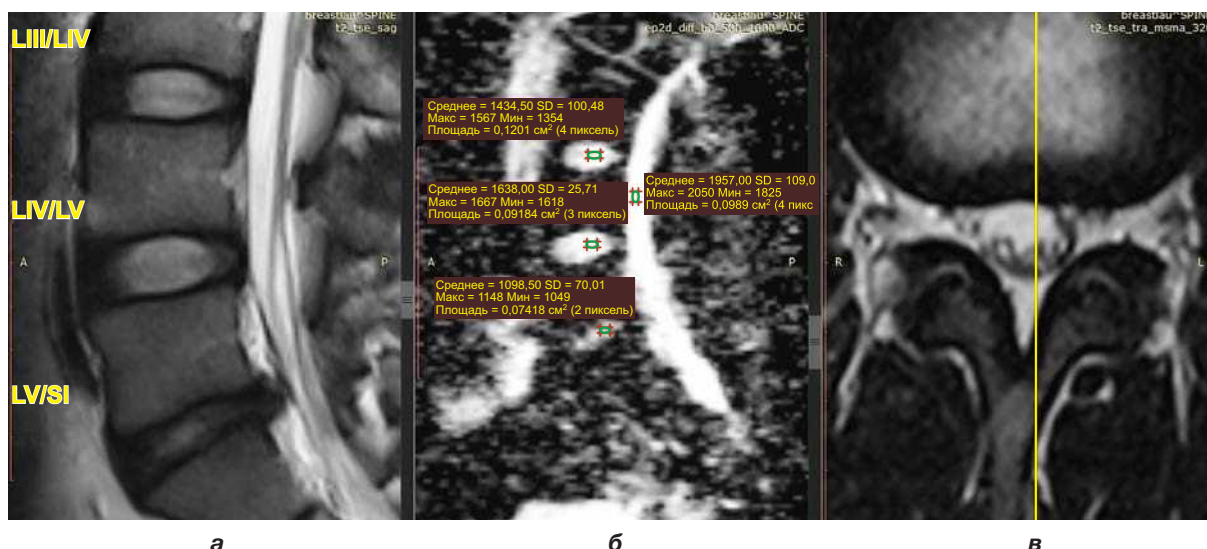


Рис. 1. МРТ-изображение поясничного отдела позвоночника с дегенерированными дисками и не дегенерированным диском: **а** – T2-взвешенное изображение с указанными позвоночно-двигательными сегментами; **б** – диффузно-взвешенное изображение с измеренными показателями ИКД дисков и ликвора в сагиттальной плоскости; **в** – аксиальный срез исследуемой зоны

Fig. 1. MRI image of the lumbar spine with degenerated discs and a non-degenerated disc: **a** – T2-weighted image with the spinal motion segments indicated; **б** – diffusely weighted image with measured values of ICD discs and cerebrospinal fluid in the sagittal plane; **в** – axial section of the studied area

ТАБЛИЦА 1

ЗНАЧЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА Х У ПАЦИЕНТОВ С ДОРСОПАТИЕЙ ПОЯСНИЧНОГО ОТДЕЛА ПОЗВОНОЧНИКА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ЛОКАЛИЗАЦИИ

Уровень ПДС	Режим T2-взвешенного изображения (Pfirrmann)	Режим ДВИ		X
		ИКД _{ср. диск}	ИКД _{ликвор}	
L _{III} /L _{IV}	I	1434,50		0,73
L _{IV} /L _V	не дегенерированный	1638	1957	0,83
L _V /S _I	III	1098,50		0,56

TABLE 1

THE VALUE OF THE X COEFFICIENT IN PATIENTS WITH LUMBAR SPINE DORSOPATHY DEPENDING ON THE LOCALIZATION

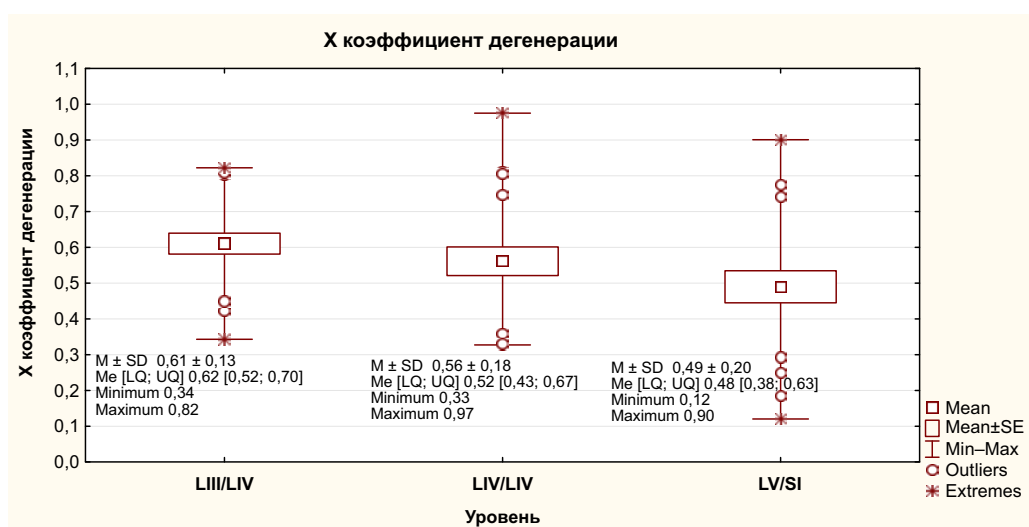


Рис. 2. Сравнение межпозвоночных уровней, демонстрирующее общий разброс значений коэффициента X в выборке: среднее значение и медиана коэффициента дегенерации X 60 межпозвоночных дисков у 20 человек для ПДС L_{III}/L_{IV}, L_{IV}/L_V, L_V/S_I

Fig. 2. Comparison of intervertebral levels demonstrating the overall spread of X coefficient values in the sample: average and median X coefficient of degeneration of 60 intervertebral discs in 20 people for L_{III}/L_{IV}, L_{IV}/L_V, L_V/S_I

ского научного центра хирургии и травматологии с жалобами на боли в поясничном отделе позвоночника на протяжении 14 лет. Своё состояние связывает с физическими нагрузками на позвоночник, переохлаждением. Боли в правой ноге появились с конца января 2023 г. Постепенно боли в пояснице, правой ноге становились более интенсивными и практически постоянными. Пациентка получала консервативное лечение у невролога по месту жительства – с временным эффектом. Выполнена МРТ поясничного отдела позвоночника. 22.06.2023 выполнена МРТ пояснично-крестцового отдела (рис. 3).

В неврологическом статусе: вертеброгенная люмбоишалгия справа; положительный симптом Лассега справа 80° (+), прямой; умеренный стойкий болевой и мышечно-тонический синдромы.

Клинический диагноз: Дорсопатия. Дегенеративно-дистрофические изменения поясничного отдела

позвоночника. Спондилоартроз L_{IV}–L_V. Протрузия на уровне L_{IV}–L_V. Люмбоишалгии справа. Умеренный болевой и мышечно-тонический синдром. (Код МКБ 10: M51.1).

24.10.2023 пациентке Л. была проведена магнитно-резонансная томография в режиме диффузно-взвешенного изображения; были определены коэффициенты диффузии пульпозного ядра межпозвонкового диска в сагиттальной и парасагиттальных плоскостях для межпозвонковых дисков на уровне позвоночно-двигательных сегментов L_{II}/L_{III}, L_{III}/L_{IV}, L_{IV}/L_V, L_V/S_I и коэффициент диффузии ликвора просвета дурального мешка, свободного от невралгических структур.

Значения ИКД рассчитаны автоматически с помощью программного обеспечения и отображены в виде параметрической карты, на которой и были выделены области интереса: ИКД_{ср. диск}; ИКД_{ликвор}. Полученные показатели представлены в таблице 2.

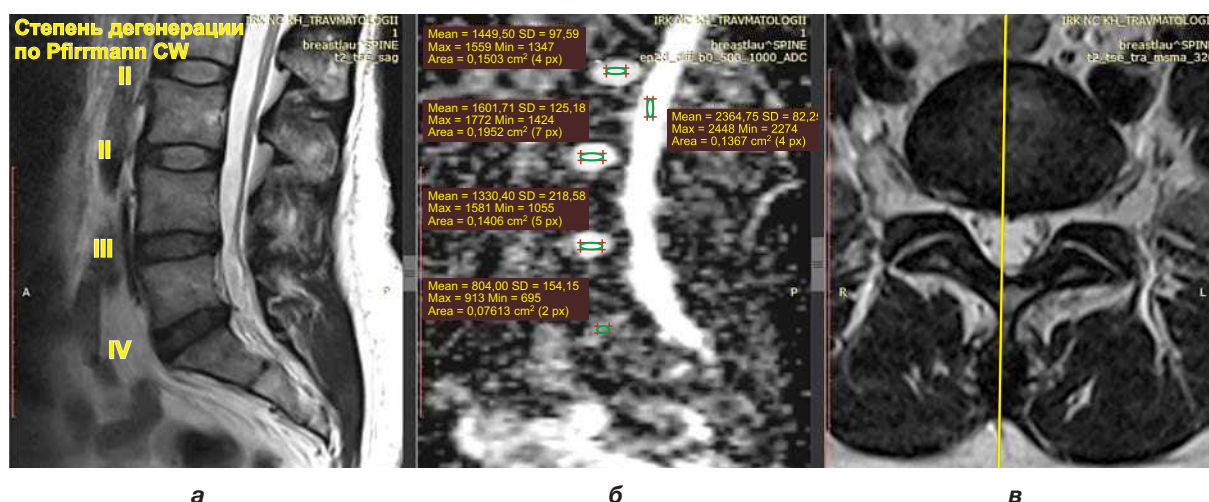


Рис. 3. Пациентка Л., МРТ-изображение поясничного отдела позвоночника: **а** – T2-взвешенное изображение с оценкой изменений по Pfirrmann в сагиттальной плоскости; **б** – диффузно-взвешенное изображение с измеренными показателями ИКД дисков и ликвора в сагиттальной плоскости; **в** – аксиальный срез исследуемой зоны. Дегенеративно-дистрофические изменения поясничного отдела позвоночника. Спондилоартроз L_{IV}–L_V. Протрузия на уровне L_{IV}–L_V. Спондилёз

Fig. 3. Patient L., MRI image of the lumbar spine: **a** – T2 weighted image with Pfirrmann assessment of changes in the sagittal plane; **б** – diffusely weighted image with measured values of measured diffusion coefficient of discs and cerebrospinal fluid in the sagittal plane; **в** – axial section of the studied area. Degenerative-dystrophic changes of the lumbar spine. Spondyloarthritis L_{IV}–L_V. Protrusion at the L_{IV}–L_V level. Spondylosis

ТАБЛИЦА 2

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДЕГЕНЕРАЦИИ МЕЖПОЗВОНКОВЫХ ДИСКОВ ПО КЛАССИФИКАЦИИ PFIRRMANN И РАССЧИТАННОМУ КОЭФФИЦИЕНТУ X (НА ПРИМЕРЕ ПАЦИЕНТКИ Л.)

TABLE 2

COMPARATIVE CHARACTERISTICS OF INTERVERTEBRAL DISC DEGENERATION ACCORDING TO THE PFIRRMANN CLASSIFICATION AND THE CALCULATED X COEFFICIENT (CASE OF PATIENT L.)

Уровень ПДС	Режим T2-взвешенного изображения (Pfirrmann)	Режим ДВИ		X
		ИКД _{ср. диск}	ИКД _{ликвор}	
L _{II} /L _{III}	II	1449,50	2364,75	0,61
L _{III} /L _{IV}	II	1601,71		0,68
L _{IV} /L _V	III	1330,40		0,56
L _V /S _I	IV	804		0,34

Были установлены величины коэффициентов дегенерации межпозвонковых дисков для исследованных уровней ПДС:

$$X_{L_{II}/L_{III}} = 1449,50 / 2364,75 = 0,61$$

$$X_{L_{III}/L_{IV}} = 1601,71 / 2364,75 = 0,68$$

$$X_{L_{IV}/L_V} = 1330,40 / 2364,75 = 0,56$$

$$X_{L_V/SI} = 804 / 2364,75 = 0,34$$

Из сравнения величин X с показателями степени дегенерации по Pfirrmann установлено значимое расхождение цифровых показателей для межпозвонковых дисков L_{II}/L_{III} , L_{III}/L_{IV} , следовательно, предлагаемый и рассчитанный коэффициент диффузии более точно и специфично отразил произошедшие дегенеративные изменения у пациентки.

ОБСУЖДЕНИЕ

Настоящее исследование демонстрирует, что предлагаемый коэффициент дегенерации (X), рассчитываемый как отношение измеряемого коэффициента диффузии (ИКД) пульпозного ядра к ИКД ликвора, является эффективным инструментом для количественной оценки дегенеративных изменений в межпозвонковых дисках. Установленный пороговый уровень $X < 0,8$ для идентификации дегенерированных дисков обладает высокой диагностической значимостью, а также важен для выбора тактики лечения и динамического наблюдения за изменениями в межпозвонковых дисках.

Результаты работы коррелируют с выводами других исследований, подтверждающих потенциал диффузионно-взвешенной МРТ (ДВИ) в диагностике дегенерации дисков [2, 3, 20]. В частности, W. Zhang и соавт. (2014) показали, что значения ИКД пульпозного ядра значимо снижаются при дегенерации, что подтверждает патофизиологическую основу нашего метода – уменьшение гидратации и подвижности молекул воды в дегенерированном диске [19]. Однако ключевым ограничением является вариабельность абсолютных значений ИКД, полученных на аппаратах МРТ разной мощности и с разными настройками последовательностей, что затрудняет сравнение результатов между центрами. Предлагаемый нами коэффициент X позволяет нивелировать это ограничение. Использование ИКД ликвора в качестве внутреннего референса является методически обоснованным шагом. Ликвор представляет собой относительно стабильную среду с высоким и постоянным коэффициентом диффузии. Нормирование на него позволяет абстрагироваться от абсолютных значений сигнала и минимизировать влияние артефакта «сигнал-шум» и аппаратных вариаций, превращая коэффициент X в унифицированный, воспроизводимый параметр, не зависящий от мощности томографа. Этот подход концептуально близок к методам количественной МРТ, активно развивающимся в последние годы для объективизации диагностики [1, 2].

Как показано в работе, сравнение коэффициента X с классификацией Pfirrmann не выявило прямой линейной корреляции. Это не является недостатком предложенного метода, а напротив, подчёркивает его принципиальное преимущество. Классификация Pfirrmann основана на субъективной визуальной оценке интенсивности МР-сигнала в T2-режиме, которая страдает от значительной межэкспертной операторской вариабельности [12, 20]. Кроме того, T2-взвешенные изображения чувствительны к грубым морфологическим изменениям (при снижении высоты диска снижается интенсивность сигнала), которые являются относительно поздними проявлениями дегенерации. В отличие от этого, коэффициент X , будучи количественным параметром, отражает ранние биохимические и микроструктурные изменения на уровне гидратации и целостности матрикса пульпозного ядра, которые опережают макроскопические изменения, видимые в T2-режиме [2, 19]. Таким образом, расхождение между X и стадией по Pfirrmann может указывать на раннюю, ещё не визуализируемую стандартными методами стадию дегенерации, что открывает возможности для досимптомной диагностики.

Клинический пример пациентки Л. демонстрирует практическую ценность и повышенную чувствительность предложенного метода. При стандартной оценке по Pfirrmann диски на уровнях L_{II}/L_{III} и L_{III}/L_{IV} были отнесены к одинаковой II стадии дегенерации. Однако расчёт коэффициента X выявил между ними существенную количественную разницу – 0,61 и 0,68. Это различие, неуловимое при визуальном анализе, указывает на то, что дегенеративные изменения в диске L_{II}/L_{III} являются более выраженными. Данный случай иллюстрирует, что коэффициент X обеспечивает более тонкую и объективную градацию состояния дисков. Это имеет прямое клиническое значение для стратификации пациентов, планирования тактики лечения (например, выбора мишени для интервенционных методов воздействия) и для динамического наблюдения. Количественный характер метода позволяет фиксировать незначительные изменения в состоянии диска ещё до того, как они приведут к смене визуальной стадии по Pfirrmann. Для пациентов с длительным болевым синдромом, как в представленном случае, это открывает возможности для более точной диагностики и, как следствие, для более целенаправленного и эффективного лечения.

ОГРАНИЧЕНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Настоящее исследование, как и любая пилотная работа, имеет ряд ограничений. Основным ограничением является относительно небольшой объём выборки, который не позволил провести валидацию пороговых значений коэффициента X для каждой отдельной стадии дегенерации по Pfirrmann. Кроме того, одноцентровой дизайн и отсутствие стратифи-

кации пациентов по возрастным группам могут влиять на обобщаемость результатов. Однако, учитывая, что первостепенной целью данной работы было доказательство концепции, представленный объём данных (60 дисков) является достаточным. Он позволил продемонстрировать принципиальную работоспособность метода, установить предварительный диагностический порог ($X < 0,8$) и показать его способность выявлять микроструктурные изменения, не различаемые при стандартной визуальной оценке. Перспективы дальнейших исследований заключаются в проведении крупномасштабных многоцентровых исследований с привлечением расширенной когорты пациентов для валидации коэффициента X и определения точных диагностических порогов для каждой стадии по Pfirrmann, а также в проведении возрастной стратификации для углублённого изучения влияния возрастного фактора на значения коэффициента дегенерации и в сравнении диагностической эффективности предложенного метода с другими количественными МР-технологиями, такими как T2-картирование по Pfirrmann.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, коэффициент дегенерации X является объективным, воспроизводимым и аппаратно-независимым параметром, который дополняет и совершенствует существующие методы диагностики. Его способность количественно оценивать микроструктурные изменения позволяет выявлять ранние стадии дегенерации и проводить более точную стратификацию патологии, что подтверждается результатами исследования и разбором клинического случая. Определение коэффициента дегенерации по предложенной формуле повышает точность оценки и унифицирует результаты исследований, проведённых на различных томографах. Применение этого способа в клиниках, имеющих магнитно-резонансный томограф, не требует значительных дополнительных затрат и легко интегрируется в стандартный протокол исследования.

В отличие от стандартной МРТ, количественные методы, подобные предложенному, позволяют проводить неинвазивную микроструктурную характеристику тканей и выявлять ранние биохимические маркеры дегенерации. Несмотря на значительные перспективы, для широкого внедрения количественной МРТ в рутинную клиническую практику требуется дальнейшее совершенствование технологий и накопление доказательной базы.

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Mallio C.A., Vadalà G., Russo F., Bernetti C., Ambrosio L., Zobel B.B., et al. Novel magnetic resonance imaging tools for the diagnosis of degenerative disc disease: A narrative review. *Diagnostics (Basel)*. 2022; 12(2): 420. <https://doi.org/10.3390/diagnostics12020420>
2. Russo F., Ambrosio L., Giannarelli E., Vorini F., Mallio C.A., Quattrocchi C.C., et al. Innovative quantitative magnetic resonance tools to detect early intervertebral disc degeneration changes: A systematic review. *Spine J*. 2023; 23(10): 1435-1450. <https://doi.org/10.1016/j.spinee.2023.05.011>
3. Raya J.G., Duarte A., Wang N., Mazzoli V., Jaramillo D., Blamire A.M., et al. Applications of diffusion-weighted MRI to the musculoskeletal system. *J Magn Reson Imaging*. 2024; 59(2): 376-396. <https://doi.org/10.1002/jmri.28870>
4. De Simone M., Choucha A., Ciaglia E., Conti V., Pecoraro G., Santurro A., et al. Discogenic low back pain: Anatomic and pathophysiologic characterization, clinical evaluation, biomarkers, AI, and treatment options. *J Clin Med*. 2024; 13(19): 5915. <https://doi.org/10.3390/jcm13195915>
5. Szaśadek M., Jacków-Nowicka J. Degenerative disease of the spine: How to relate clinical symptoms to radiological findings. *Adv Clin Exp Med*. 2024; 33(1): 91-98. <https://doi.org/10.17219/acem/163357>
6. Потапов В.Э., Кошкарёва З.В., Животенко А.П., Горбунов А.В., Сорокочиков В.А. Пункционные хирургические технологии в лечении фасет-синдрома при спондилоартрозах в поясничном отделе (обзор литературы). *Acta biomedica scientifica*. 2020; 5(2): 36-42. [Potapov V.E., Koshkareva Z.V., Zhivotenko A.P., Gorbunov A.V., Sorokovikov V.A. Puncture surgical technologies in the treatment of facet syndrome for spondylarthrosis in the lumbar spine (literature review). *Acta biomedica scientifica*. 2020; 5(2): 36-42. (In Russ.)]. <https://doi.org/10.29413/ABS.2020-5.2.6>
7. Bezuglov E., Lazarev A., Petrov A., Brodskaya A., Lyubushkina A., Kubacheva K., et al. Asymptomatic degenerative changes in the lumbar spine among professional soccer players. *Spine (Phila Pa 1976)*. 2021; 46(2): 122-128. <https://doi.org/10.1097/BRS.0000000000003726>
8. Żak M., Pezowicz C. Effect of overload on changes in mechanical and structural properties of the annulus fibrosus of the intervertebral disc. *Biomech Model Mechanobiol*. 2021; 20(6): 2259-2267. <https://doi.org/10.1007/s10237-021-01505-w>
9. Wang Y., He X., Chen S., Weng Y., Liu Z., Pan Q., et al. Annulus fibrosus repair for lumbar disc herniation: A meta-analysis of clinical outcomes from controlled studies. *Global Spine J*. 2024; 14(1): 306-321. <https://doi.org/10.1177/21925682231169963>
10. Seifert J., Frazer L.L., Maiman D., Shah A., Shaffer S.K., Yoganandan N., et al. Mechanical and structural changes to the annulus fibrosus in response to sub-failure cyclic loading. *Acta Biomater*. 2025; 205: 478-490. <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2025.08.047>
11. Tripathi G., Guha L., Kumar H. Seeing the unseen: The role of bioimaging techniques for the diagnostic interventions in intervertebral disc degeneration. *Bone Rep*. 2024; 22: 101784. <https://doi.org/10.1016/j.bonr.2024.101784>
12. Pfirrmann C.W., Metzendorf A., Zanetti M., Hodler J., Boos N. Magnetic resonance classification of lumbar intervertebral disc degeneration. *Spine (Phila Pa 1976)*. 2001; 26(17): 1873-1878. <https://doi.org/10.1097/00007632-200109010-00011>

13. Kushchayev S.V., Glushko T., Jarraya M., Schuleri K.H., Preul M.C., Brooks M.L., et al. ABCs of the degenerative spine. *Insights Imaging*. 2018; 9(2): 253-274. <https://doi.org/10.1007/s13244-017-0584-z>

14. Rivera Tapia E.D., Meakin J.R., Holsgrove T.P. In-vitro models of disc degeneration – A review of methods and clinical relevance. *J Biomech*. 2022; 142: 111260. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2022.111260>

15. Bielewicz J., Kamieniak M., Szymoniuk M., Litak J., Czyżewski W., Kamieniak P. Diagnosis and management of neuropathic pain in spine diseases. *J Clin Med*. 2023; 12(4): 1380. <https://doi.org/10.3390/jcm12041380>

16. Zileli M., Crostelli M., Grimaldi M., Mazza O., Anania C., Fornari M., et al. Natural course and diagnosis of lumbar spinal stenosis: WFNS Spine Committee recommendations. *World Neurosurg*. 2020; 7: 100073. <https://doi.org/10.1016/j.wnsx.2020.100073>

17. Sathish M., Eswar R. Systematic reviews and meta-analysis in spine surgery – how good are they in methodological quality? A systematic review. *Global Spine J*. 2021; 11(3): 378-399. <https://doi.org/10.1177/2192568220906810>

18. Wan Z.Y., Shan H., Liu T.F., Song F., Zhang J., Liu Z.H., et al. Emerging issues questioning the current treatment strategies for lumbar disc herniation. *Front Surg*. 2022; 9: 814531. <https://doi.org/10.3389/fsurg.2022.814531>

19. Zhang W., Ma X., Wang Y., Zhao J., Zhang X., Gao Y., et al. Assessment of apparent diffusion coefficient in lumbar intervertebral disc degeneration. *Eur Spine J*. 2014; 23(9): 1830-1836. <https://doi.org/10.1007/s00586-014-3285-z>

20. Tamagawa S., Sakai D., Nojiri H., Sato M., Ishijima M., Watanabe M. Imaging evaluation of intervertebral disc degeneration and painful discs – advances and challenges in quantitative MRI. *Diagnostics (Basel)*. 2022; 12(3): 707. <https://doi.org/10.3390/diagnostics12030707>

21. Ларионов С.Н., Сорокинов В.А., Животенко А.П., Потапов В.Э., Вельм А.И. *Способ определения дегенерации межпозвонкового диска поясничного отдела позвоночника*: Патент № 2841730 Рос. Федерация. 2024; (17). [Larionov S.N., Sorokovikov V.A., Zhivotenko A.P., Potapov V.E., Velm A.I. *Method for determining degeneration of the lumbar intervertebral disc*: Patent of the Russian Federation No. 2841730. 2024; (17). (In Russ)].

Соответствие принципам этики

Протокол исследования был одобрен локальным этическим комитетом. Одобрение и процедуру проведения протокола получали по принципам Хельсинкской конвенции.

Конфликт интересов

Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Источник финансирования

Авторы декларируют отсутствие внешнего финансирования для проведения исследования и публикации статьи.

Вклад авторов

Ларионов С.Н. – концепция и дизайн исследования.
Сорокинов В.А. – общее руководство проектом и редактирование текста.
Селивёрстов П.В. – проведение МРТ-исследований и интерпретация данных визуализации; курирование пациентов и сбор клинического материала.
Животенко А.П. – разработка методики, сбор и анализ данных; статистическая обработка и анализ результатов.
Потапов В.Э. – курирование пациентов и сбор клинического материала.
Вельм А.И. – разработка методики, сбор и анализ данных; проведение МРТ-исследований и интерпретация данных визуализации.

Информация об авторах

Ларионов Сергей Николаевич – д.м.н., ведущий научный сотрудник, заведующий научно-клинического отдела нейрохирургии, Иркутский научный центр хирургии и травматологии, 664003, г. Иркутск, ул. Борцов Революции, 1, Россия. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9189-3323>

Сорокинов Владимир Алексеевич – д.м.н., профессор, директор, Иркутский научный центр хирургии и травматологии, 664003, г. Иркутск, ул. Борцов Революции, 1, Россия. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9008-6383>

Селивёрстов Павел Владимирович – д.м.н., ведущий научный сотрудник научно-клинического отдела нейрохирургии, Иркутский научный центр хирургии и травматологии, 664003, г. Иркутск, ул. Борцов Революции, 1, Россия. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4050-9157>

Ethics approval

The study was approved by the local ethics committee. The approval and procedure for the protocol were obtained in accordance with the principles of the Helsinki Convention.

Conflict of interest

The authors declare no apparent or potential conflict of interest related to the publication of this article.

Funding source

The authors declare no external funding for the study and publication of the article.

Authors' contribution

Larionov S.N. – research concept and design.
Sorokovikov V.A. – overall project management and text editing.
Seliverstov P.V. – MRI examinations and visualization data interpretation; patient management and clinical data collection.
Zhivotenko A.P. – methodology development, data collection, and analysis; statistical processing and results analysis.
Potapov V.E. – patient management and clinical data collection.
Velm A.I. – methodology development, data collection, and analysis; MRI examinations and visualization data interpretation.

Information about the authors

Sergey N. Larionov – Dr. Sci. (Med.), Leading Researcher, Head of the Scientific and Clinical Department of Neurosurgery, Irkutsk Scientific Centre of Surgery and Traumatology, 664003, Irkutsk, Bortsov Revolyutsii str., 1, Russian Federation. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9189-3323>

Vladimir A. Sorokovikov – Dr. Sci. (Med.), Professor, Director, Irkutsk Scientific Centre of Surgery and Traumatology, 664003, Irkutsk, Bortsov Revolyutsii str., 1, Russian Federation. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9008-6383>

Pavel V. Seliverstov – Dr. Sci. (Med.), Leading Researcher at the Scientific and Clinical Department of Neurosurgery, Irkutsk Scientific Centre of Surgery and Traumatology, 664003, Irkutsk, Bortsov Revolyutsii str., 1, Russian Federation. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4050-9157>

Животенко Александр Петрович – научный сотрудник научно-клинического отдела нейрохирургии, Иркутский научный центр хирургии и травматологии, 664003, г. Иркутск, ул. Борцов Революции, 1, Россия.
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4032-8575>

Потапов Виталий Энгельсович – к.м.н., ведущий научный сотрудник, научно-клинический отдел нейрохирургии, Иркутский научный центр хирургии и травматологии, 664003, г. Иркутск, ул. Борцов Революции, 1, Россия.
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9167-637X>

Вельм Андрей Иванович – к.м.н., врач рентгенолог, Иркутский научный центр хирургии и травматологии, 664003, г. Иркутск, ул. Борцов Революции, 1, Россия.

Для переписки

Животенко Александр Петрович, sivotenko1976@mail.ru

Aleksandr P. Zhivotenko – Researcher at the Scientific and Clinical Department of Neurosurgery, Irkutsk Scientific Centre of Surgery and Traumatology, 664003, Irkutsk, Bortsov Revolyutsii str., 1, Russian Federation.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4032-8575>

Vitaly E. Potapov – Cand. Sci. (Med.), Leading Researcher at the Scientific and Clinical Department of Neurosurgery, Irkutsk Scientific Centre of Surgery and Traumatology, 664003, Irkutsk, Bortsov Revolyutsii str., 1, Russian Federation.
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9167-637X>

Andrey I. Velm – Cand. Sci. (Med.), Radiologist, Irkutsk Scientific Centre of Surgery and Traumatology, 664003, Irkutsk, Bortsov Revolyutsii str., 1, Russian Federation.

Corresponding author

Aleksandr P. Zhivotenko, sivotenko1976@mail.ru

Получена 23.11.2025
Принята 01.12.2025
Опубликована 10.12.2025

Received 23.11.2025
Accepted 01.12.2025
Published 10.12.2025