

МЕДИЦИНСКАЯ ХИМИЯ/MEDICAL CHEMISTRY

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.172.29> EDN: DLDCFL

ИЗУЧЕНИЕ СТЕПЕНИ ГИДРАТИРОВАННОСТИ ТКАНИ ПУЛЬПОЗНОГО ЯДРА МЕЖПОЗВОНКОВОГО ДИСКА ЧЕЛОВЕКА МЕТОДОМ ИНФРАКРАСНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ

Научная статья

Алексахина Е.Л.¹, Игошин И.П.², Томилова И.К.³, Филимонов Д.А.^{4,*}, Смирнов В.П.⁵, Арутюнян А.С.⁶, Волков Г.В.⁷, Смирнов Н.Н.⁸¹ ORCID : 0000-0001-5265-6974;³ ORCID : 0000-0002-3692-4884;⁴ ORCID : 0009-0007-7766-8198;⁸ ORCID : 0000-0004-1571-1654;^{1, 3, 4, 6} Ивановский государственный медицинский университет, Иваново, Российская Федерация² Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина, Иваново, Российская Федерация⁵ Семейная клиника «Здоровье», Кинешма, Российская Федерация⁷ Кинешемская центральная районная больница, Кинешма, Российская Федерация⁸ Ивановский государственный химико-технологический университет, Иваново, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (fdaleks[at]vk.com)

Предложена: 27.08.2026; Принята: 28.09.2026; Опубликовано: 16.10.2026

Аннотация

Цель исследования — оценить содержание свободной и связанной воды в ткани пульпозного ядра человека методом инфракрасной спектроскопии с Фурье-преобразованием. Исследовали 11 образцов ткани пульпозного ядра, удалённых при плановых пункционных декомпрессивных нуклеопластиках с одномоментным измерением внутридискового давления (нейрохирургическое отделение городской клинической больницы г. Кинешма). Инфракрасные спектры регистрировали на Фурье-спектрометре TENSOR-27 (Bruker Optics, Германия) и обрабатывали в программе OPUS-6. Методом Фурье-деконволюции по Лоренцу выделяли полосы поглощения свободной и связанной воды, исключая вклад валентных колебаний N–H пептидных связей коллагена. Рассчитывали спектральный индекс онко/гидро (сО/Г) как отношение разности площадей пиков связанной и свободной воды к их сумме (диапазон от +1 — только связанная вода, до –1 — только свободная вода). Проводили сопоставление с модельным индексом, вычисленным по геометрической модели проницаемости пульпозного ядра. Повышение внутридискового давления сопровождалось батохромным сдвигом спектральных максимумов в области 3200–3650 см^{–1} и увеличением доли связанной воды. Для образцов с внутридисковым давлением 40, 30 и 25 см вод. ст. спектральный индекс составил +0,37, +0,13 и –0,11 соответственно, что хорошо согласуется с расчётными значениями модели (+0,35; +0,11; –0,08). Метод Фурье-инфракрасной спектроскопии в сочетании с деконволюционным анализом позволяет количественно определять соотношение свободной и связанной воды в ткани пульпозного ядра, что может служить инструментом оценки состояния протеогликанового матрикса.

Ключевые слова: пульпозное ядро, межпозвонковый диск, гидратация, свободная вода, инфракрасная спектроскопия, Фурье-преобразование, внутридисковое давление.

STUDY OF THE DEGREE OF HYDRATION IN THE NUCLEUS PULPOSUS OF THE HUMAN INTERVERTEBRAL DISC USING INFRARED SPECTROSCOPY

Research article

Aleksakhina Y.L.¹, Igoshin I.P.², Tomilova I.K.³, Filimonov D.A.^{4,*}, Smirnov V.P.⁵, Arutyunyan A.S.⁶, Volkov G.V.⁷, Smirnov N.N.⁸¹ ORCID : 0000-0001-5265-6974;³ ORCID : 0000-0002-3692-4884;⁴ ORCID : 0009-0007-7766-8198;⁸ ORCID : 0000-0004-1571-1654;^{1, 3, 4, 6} Ivanovo State University of Medicine, Ivanovo, Russian Federation² Ivanovo State Power University, Ivanovo, Russian Federation⁵ Family clinic "Health", Kineshma, Russian Federation⁷ Kineshma Central District Hospital, Kineshma, Russian Federation⁸ Ivanovo State University of Chemistry and Technology, Ivanovo, Russian Federation

* Corresponding author (fdaleks[at]vk.com)

Suggested: 27.08.2026; Accepted: 28.09.2026; Published: 16.10.2026

Abstract

The aim of the study is to evaluate the content of clear and bound water in human nucleus pulposus using Fourier-transform infrared spectroscopy. 11 samples of nucleus pulposus tissue were examined, which had been removed during elective puncture decompression nucleoplasty procedures with simultaneous measurement of intradiscal pressure

(Neurosurgery Department, Kineshma City Clinical Hospital). The infrared spectra were recorded using a TENSOR-27 Fourier transform spectrometer (Bruker Optics, Germany) and analysed using the OPUS-6 software. Using the Lorentz Fourier deconvolution method, absorption bands of clear and bound water were isolated, excluding the contribution of valence vibrations of N–H peptide bonds in collagen. The spectral onco/hydro (sO/H) index was calculated as the ratio of the difference in the peak areas of bound and free water to their sum (ranging from +1 — bound water only — to –1 — free water only). A comparison was made with a model index calculated using a geometric model of the permeability of the pulposus nucleus. An increase in intradiscal pressure was accompanied by a bathochromic shift of the spectral maxima in the 3200–3650 cm^{-1} region and an increase in the proportion of bound water. For samples with intradiscal pressure of 40, 30 and 25 $\text{cm H}_2\text{O}$, the spectral index was +0.37, +0.13 and –0.11 respectively, which is in good agreement with the model's calculated values (+0.35; +0.11; –0.08). The Fourier-transform infrared spectroscopy method, combined with deconvolution analysis, enables the quantitative determination of the ratio of clear to bound water in the nucleus pulposus, which can serve as a tool for assessing the condition of the proteoglycan matrix.

Keywords: nucleus pulposus, intervertebral disc, hydration, clear water, infrared spectroscopy, Fourier transform, intradiscal pressure.

Введение

Межпозвоночный диск (МПД) человека анатомически делится на три составляющие части: внутренняя (центральная) часть — пульпозное ядро (ПЯ), наружный участок — фиброзное кольцо (ФК) и третья составляющая — тонкий слой гиалинового хряща (замыкательная пластинка), который сверху и снизу отделяет диск от тел смежных позвонков. В большинстве случаев болевой синдром в спине человека [1] обусловлен дегенерацией МПД. Считается, что дегенеративно-дистрофическому процессу в МПД предшествует повреждение, инициирующее каскад патологических реакций, сначала в гиалиновой пластинке с последующим распространением на ПЯ и ФК [2]. Изменения матрикса в ПЯ включают в себя фрагментацию протеогликановых агрегатов (ПГА) с последующим снижением их концентрации. При этом уменьшается количество связанной воды и жизнеспособных хондроцитов [1], [3].

По данным Глобального исследования бремени болезней 2021, в 2020 году боль в нижней части спины зарегистрирована у 619 млн человек, к 2050 году прогнозируется рост числа случаев до 843 млн, что делает данное состояние ведущей причиной инвалидности в мире [21]. У лиц старше 65 лет распространённость дегенеративных изменений межпозвоночных дисков превышает 90% [22]. Ключевым патогенетическим звеном дегенерации является прогрессирующая потеря протеогликанов, приводящая к снижению содержания воды в пульпозном ядре и нарушению его биомеханических свойств [23], [20].

Основным структурным компонентом ПЯ и ФК является фибриллярный белок коллаген, погружённый в гель ПГА. Сеть коллагена выполняет две основные функции: армирующую и связывающую ПГА. Основой ПГА является полимерная гиалуроновая кислота (ГК) — несulfатированный глюкозаминогликан, мономер которой образован D-глюкуроновой кислотой и N-ацетил-D-глюкозамином. Химическая природа веществ, входящих в протеогликаны МПД, обеспечивает отрицательный заряд их макромолекул, притягивающий дипольные молекулы воды. Поэтому вода является одним из основных компонентов ПЯ МПД; её содержание варьирует от 77% у лиц старшей возрастной группы до 90 % у младенцев [3]. Связывание воды и набухание ПЯ определяют упруго-эластические свойства ткани. К факторам, вызывающим дегенерацию МПД, относят снижение проницаемости краевых гиалиновых пластинок, чрезмерные физические нагрузки и ряд других причин [4].

Для детального анализа водных, в том числе и гетерогенных, систем давно используются методы ИК-спектроскопии. Полоса валентных колебаний ОН-групп находится в диапазоне волновых чисел 3100–3700 cm^{-1} , однако её контур представляет собой широкую слабо разрешённую кривую. Для выделения индивидуальных компонент применяют Фурье-деконволюцию [5]. Подход с использованием этого метода показал, что структуру валентной полосы ОН можно описать несколькими спектральными компонентами: низкочастотный максимум 3000–3100 cm^{-1} , максимумы около ~3200, ~3300 cm^{-1} , самая интенсивная полоса ~3450 cm^{-1} и высокочастотные полосы ~3550 и ~3630 cm^{-1} [5]. Высокочастотные полосы относятся к колебаниям ОН-групп с разорванной водородной связью; полоса ~3450 cm^{-1} — к ОН-группам с ослабленными водородными связями; низкочастотная полоса 3000–3100 cm^{-1} обусловлена ассоциатами с прочной тетраэдрической координацией, подобной льду [5]. В этом же диапазоне находится полоса амида А коллагена (~3400 cm^{-1}), относящаяся к валентному колебанию N–H связи, что существенно усложняет анализ водно-белковых систем [6]. В литературе имеются примеры оценки содержания свободной и связанной воды в системе коллагеновых волокон с помощью ИК-спектроскопии, в том числе с использованием Фурье-преобразований [6]. Современные спектроскопические подходы рассматриваются как перспективные для неинвазивной оценки состояния межпозвоночных дисков [7].

Научная новизна настоящего исследования заключается в том, что впервые гидратацию пульпозного ядра оценивают количественно по ИК-спектрам с Фурье-деконволюцией, отдельно определяя свободную и связанную воду в операционном материале. Также впервые спектральный индекс сопоставлен с модельным индексом, рассчитанным по геометрической модели проницаемости пульпозного ядра.

Цель исследования — оценить содержание свободной и связанной воды в ткани пульпозного ядра человека методом ИК-спектроскопии с Фурье-преобразованием.

Методы и принципы исследования

Дизайн исследования: одномоментное (поперечное) обсервационное исследование образцов ткани, полученных интраоперационно.

Материалом служили ткани удалённого фрагмента ПЯ во время плановых операций пункционной декомпрессивной нуклеопластики МПД с одновременным измерением внутридискового давления (ВДД) [8] (нейрохирургическое отделение городской клинической больницы г. Кинешма). Получено 11 образцов; измеренные значения ВДД составили от 25 до 60 см вод. ст. Образцы выкладывали на KRS-стекло, хранили не более суток при температуре около 4 °С в герметичных контейнерах. Перед записью спектров образцы термостатировали при 22 °С.

ИК-спектры регистрировали на Фурье-спектрометре TENSOR-27 (Bruker Optics, Германия) и обрабатывали программным обеспечением OPUS-6. Для разделения вкладов свободной и связанной воды применяли Фурье-деконволюцию по модели Лоренца; полосу валентных колебаний N–H пептидных связей коллагена исключали из расчёта. Спектральный индекс онко/гидро (сО/Г) вычисляли как отношение разности площадей пиков связанной и свободной воды в диапазоне 3200–3650 см⁻¹ к их сумме; индекс принимает значения от +1 (только связанная вода) до –1 (только свободная вода). Для сопоставления использовали геометрическую модель проницаемости ПЯ, разработанную авторами [9], [10], [11].

Основные результаты

Упругость ткани ПЯ определяется присутствием воды, иммобилизованной комплексом коллагеновых фибрилл (КФ) и ПГА. Деструкция ПГА высвобождает воду и снижает упругость ядра. «Связанной» считают воду, удерживаемую силами межмолекулярного взаимодействия компонентами ПЯ; «свободной» — воду, находящуюся в пространстве между волокнами коллагена с растворёнными в ней продуктами распада ГК. Полосы поглощения этих двух типов воды в ИК-спектре различны, так как на них по-разному действуют ван-дер-ваальсовы, ионно-электростатические силы и водородные связи [3], [5]. Положения максимумов поглощения обоих типов воды отличаются от модельных, поскольку ионная сила этих водных систем различается [5].

Полученные спектры (рис. 1) представляют собой типичные спектры коллагена [6], в которых выделяются характерные для белка области. Амид А — широкая полоса поглощения с максимумом при 3295 см⁻¹, комбинированная, обусловленная колебательными модами воды и валентными колебаниями N–H пептидных связей коллагена.

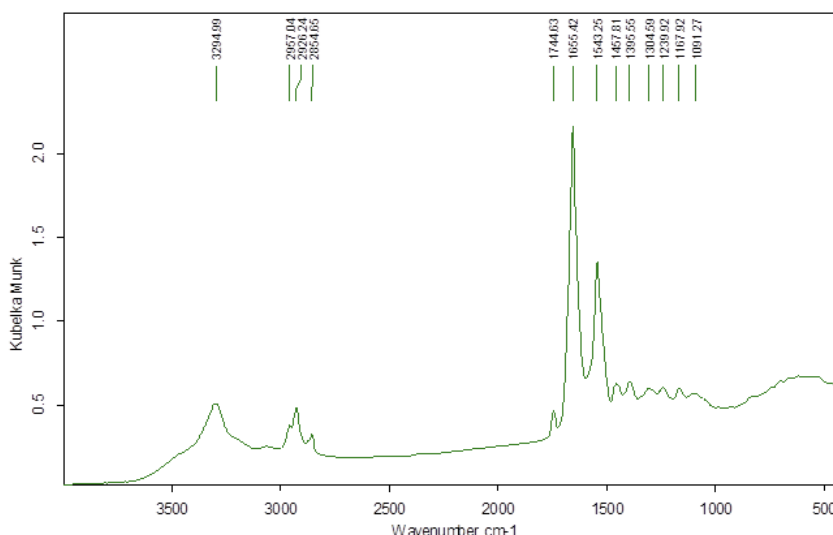


Рисунок 1 - ИК-спектр ткани пульпозного ядра

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.172.29.1>

Примечание: ВДД 50 см вод. ст.

Сравнение спектров образцов с разным ВДД (рис. 2) показывает, что повышение давления вызывает батохромный сдвиг этой полосы, то есть изменяется соотношение свободной и связанной воды.

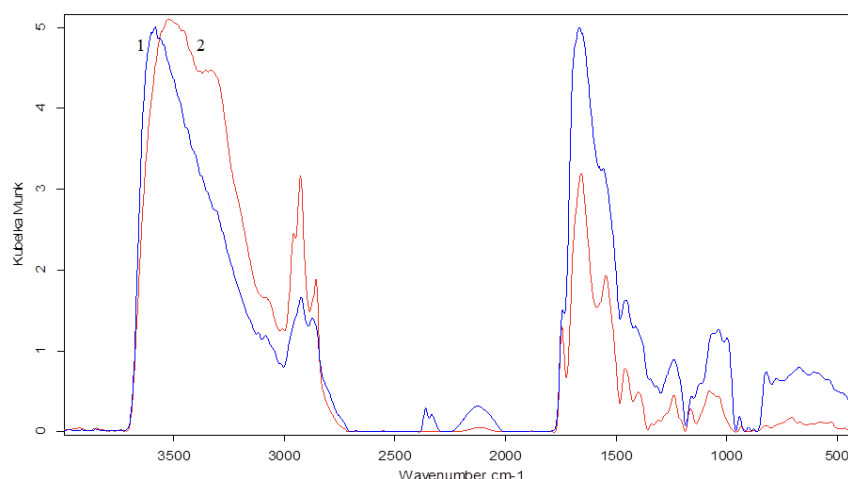


Рисунок 2 - Нормализованные путём приведения к базовой линии ИК-спектры образцов ткани ПЯ с внутридисковым давлением 25 (1) и 55 (2) см вод. ст
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.172.29.2>

Деконволюция (рис. 3) позволила разложить наблюдаемые контуры на полосы свободной и связанной воды и выделить полосу N–H валентных колебаний [5], [6]. Анализ площадей пиков свидетельствует, что при большем осмотическом давлении относительное содержание прочно удерживаемой («связанной») воды выше, чем свободной. Для образца с ВДД 40 см вод. ст. суммарная площадь пиков связанной воды составила 114,1, свободной — 52,2, индекс сО/Г = +0,37; для ВДД 30 см вод. ст. — 1406,2 и 1080,7, индекс +0,13; для ВДД 25 см вод. ст. — 60,5 и 76,0, индекс – 0,11.

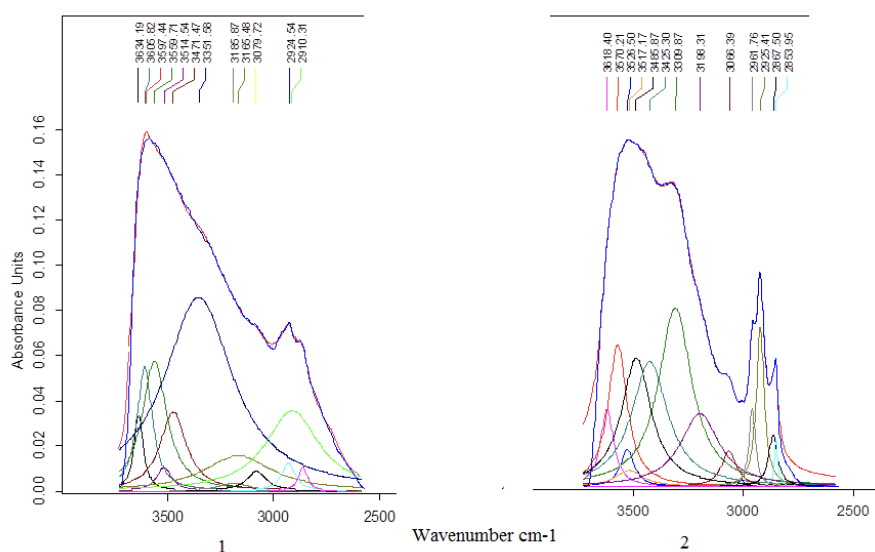


Рисунок 3 - Фурье-деконволюция образцов ткани ПЯ с внутридисковым давлением 25 (1) и 55 (2) см вод. ст
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.172.29.3>

Модельный индекс мО/Г рассчитывали по геометрической модели проницаемости ПЯ как отношение разности площади, занятой ПГА и КФ, и площади свободного пространства к их сумме [9], [10], [11]. Диапазон изменения мО/Г в моделях составляет от +0,87 до –0,84. Меньший по модулю максимум по сравнению со спектральным индексом объясняется тем, что в упаковке структурных элементов модели всегда присутствует некоторое количество свободной воды, а деструкция коллагеновых фибрилл не рассматривается.

В табл. 1 представлены зависимости ВДД от индекса онко/гидро, полученные по результатам ИК-спектроскопии и по геометрической модели проницаемости ПЯ. Модель подбирали по наиболее близким значениям ВДДм к экспериментальному ВДДэ.

Таблица 1 - Сопоставление спектрального и модельного индексов онко/гидро

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.172.29.4>

ИК-спектроскопия Образцы ткани № 5, 6, 2		Подобранная по проницаемости геометрическая модель	
ВДДэ, см вод. ст.	Индекс сО/Г	ВДДм, см вод.ст.	Индекс мО/Г
40	+0.37	36	+0.35
30	+0.13	26	+0.11
25	-0.11	22	-0.08

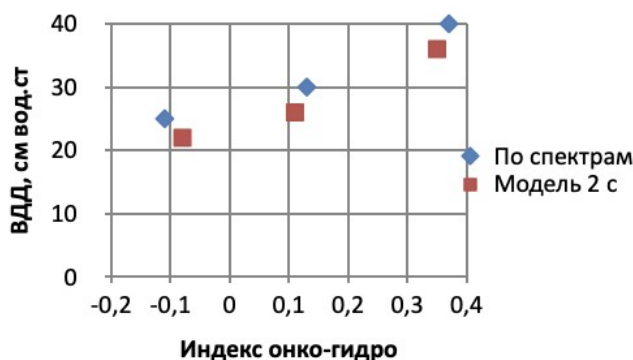


Рисунок 4 - Графическая зависимость ВДД от индекса онко/гидро

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.172.29.5>

Обсуждение

Полученные данные согласуются с представлениями о том, что при дегенерации МПД происходит снижение pH в центре ПЯ до 6,4 вследствие лактат-ацидоза [4]. Уменьшение pH подавляет диссоциацию кислых групп ПГА, суммарный заряд падает, количество связанной воды уменьшается, а свободной — возрастает. В кислой среде ускоряется выработка гиалуронидазы [12], хотя её активность существенно не изменяется [13]. Это ведёт к фрагментации ПГА и вымыванию глюкозаминогликанов. ПЯ дегидратируется, внутридисковое осмотическое давление падает, высвободившаяся вода фильтруется через коллагеновую сеть. Доказано, что при острых и хронических дегенеративных изменениях МПД содержание ГК в ПЯ существенно различается; концентрация ГК пропорциональна осмотическому давлению [14]. Период полураспада ГК, протекающий под действием фермента гиалуронидазы, в организме человека составляет 2 суток, однако непрерывный синтез ГК приводит к обновлению её состава каждые 2–3 дня [15]. Молекулярная масса ГК варьирует в широких пределах (от 5000 до 20 000 000 Да); например, средняя ММ макромолекул ГК в синовиальной жидкости человека составляет 3 140 000 Да [16]. Волокна коллагена, входящие в состав ПЯ, толщиной 1,5 нм упакованы в фибриллы диаметром до 300 нм; в состав коллагена также входит связанная вода, играющая существенную роль в механизме образования коллагеновых фибрилл [17]. Сформировавшиеся КФ практически не смачиваются свободной водой и не оказывают сопротивления движению жидкости вдоль волокна [17]. МПД в поясничном отделе позвоночника способен выдерживать относительное давление до 2,5 МПа [18].

Сравнение спектрального и модельного индексов показывает хорошее согласие: для трёх образцов различия не превышают 0,05, что подтверждает адекватность как спектрального метода оценки гидратации, так и геометрической модели проницаемости ПЯ. Следует отметить, что значение ВДДм в модели отличается для разных значений времени падения измерительной капли (2, 3 и более секунд), что следует учитывать при сопоставлении [9], [10], [11].

В недавнем исследовании Vettese et al. [19] показано, что процессы децеллюляризации и стерилизации коллагеновых матриц сопровождаются изменением их гидратации и структуры поперечных сшивок, что подчёркивает важность контроля содержания воды в тканях на основе коллагена. Это согласуется с нашими результатами о связи степени гидратации ПЯ с его функциональным состоянием.

Заключение

В работе исследованы ИК-спектры образцов ткани ПЯ МПД с различной степенью деструкции ПГА. Образцы получены во время функциональной декомпрессивной нуклеопластики с одновременным измерением внутридискового давления (ВДДэ). Для количественной оценки использован безразмерный параметр — спектральный индекс онко/гидро (сО/Г), вычисляемый по результатам деконволюции и Фурье-анализа полос поглощения 3200–3650 см⁻¹. Полученные значения сО/Г сопоставлены с модельным индексом мО/Г, рассчитанным по геометрической модели проницаемости ПЯ. Сравнение указывает на возможность применения предложенного спектрального подхода для оценки гидратированности пульпозного ядра и состояния его протеогликанового матрикса.

**Конфликт интересов**

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

1. Бывальцев В.А. Дегенерация межпозвонкового диска и возможности тканевой инженерии: обзор литературы / В.А. Бывальцев, И.А. Степанов, Л.А. Бардонова [и др.] // Хирургия позвоночника. — 2017. — Т. 14. — № 1. — С. 60–67.
2. Adams M.A. Mechanical initiation of intervertebral disc degeneration / M.A. Adams, D.J. Freeman, H.P. Morrison [et al.] // Spine. — 2000. — Vol. 25. — P. 1625–1636.
3. Амандусова А.Х. Физико-химические свойства и методы количественного определения гиалуроновой кислоты (обзор) / А.Х. Амандусова, К.Р. Савельева, А.В. Морозов [и др.] // Разработка и регистрация лекарственных средств. — 2020. — Т. 9. — № 4. — С. 136–140.
4. Ткачев А.М. Патофизиологические механизмы дегенерации межпозвонковых дисков / А.М. Ткачев, А.В. Епифанов, Е.С. Акарачкова [и др.] // РМЖ. Медицинское обозрение. — 2019. — № 4 (II). — С. 72–77.
5. Буриков С.А. Компьютерный анализ колебательных спектров водно-этанольных растворов / С.А. Буриков, Т.А. Доленко, И.С. Курчатова [и др.] // Известия высших учебных заведений. Физика. — 2012. — Т. 55. — № 4. — С. 38–43.
6. Нечипоренко А.П. Инфракрасная Фурье-спектроскопия в сравнительном исследовании животных и растительных белков / А.П. Нечипоренко, И.Э. Миневич, С.М. Орехова [и др.] // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. — 2020. — Т. 10. — № 4. — С. 678–690.
7. Tripathi G. Seeing the unseen: The role of bioimaging techniques for the diagnostic interventions in intervertebral disc degeneration / G. Tripathi, L. Guha, H. Kumar // Bone Rep. — 2024. — Vol. 22. — Art. 101784. — DOI: 10.1016/j.bonr.2024.101784.
8. Патент РФ № RU2527909C1. Способ измерения внутрисуставного давления при заболеваниях и повреждениях позвоночника / Смирнов В.П., Литвинова Н.А. — заявл. 10.01.2013; опубл. 10.09.2014, Бюл. № 25.
9. Смирнов В.П. Пункционная нуклеопластика при дискогенной боли в спине с использованием биоактивного концентрата мелких морских рыб — от экспериментальной модели к клинической практике / В.П. Смирнов, В.П. Жуков, И.П. Игошин // Лечебное дело. — 2021. — № 4. — С. 104–114.
10. Smirnov V.P. Computer diagnostics system, prediction of the state dynamics and choice of treatment methods for intervertebral discs / V.P. Smirnov, V.P. Zhukov, I.P. Igoshin // The 9th Harbin International Neurosurgical Conference; The 2019 Neuro-interventional Meeting of Chinese Neurosurgical Society; The 2nd Meeting of Neurosurgical Academic of Sino-Russia Medical Universities; The 31st Annual Meeting of the Neurosurgery Association of Heilongjiang Province. — 2019. — P. 69.
11. Смирнов В.П. Малоинвазивное лечение комбинированного дискогенного болевого синдрома поясничного отдела позвоночника / В.П. Смирнов, Н.А. Литвинова, В.П. Жуков [и др.] // XII съезд Российской Ассоциации хирургов-вертебрологов (RASS): сборник тезисов. — Москва, 2023. — С. 142.
12. Razaq S. The effect of extracellular pH on matrix turnover by cells of the bovine nucleus pulposus / S. Razaq, R.J. Wilkins, J.P.G. Urban // Eur Spine J. — 2003. — Vol. 12. — № 4. — P. 341–349.
13. Ligorio C. Acidic and basic self-assembling peptide and peptide-graphene oxide hydrogels: characterisation and effect on encapsulated nucleus pulposus cells / C. Ligorio, A. Vijayaraghavan, J.A. Hoyland [et al.] // Acta Biomater. — 2022. — Vol. 143. — P. 145–158.
14. Zöllner J. Determination of hyaluronic acid in the nucleus pulposus in acute and chronic degenerative intervertebral disc changes / J. Zöllner, T. Sancaktaroglu, A. Meurer [et al.] // Z Orthop Ihre Grenzgeb. 1999. — Vol. 137. — № 3. — P. 211.
15. Загорулько Ю.Ю. Особенности растворов гиалуроновой кислоты для внутрисуставного введения и современные тенденции в их разработке (обзор) / Ю.Ю. Загорулько, Е.Ю. Загорулько // Разработка и регистрация лекарственных средств. — 2020. — Т. 9. — № 2. — С. 45–55.
16. Сигаева Н.Н. Химическая модификация гиалуроновой кислоты и ее применение в медицине / Н.Н. Сигаева, С.В. Колесов, П.В. Назаров [и др.] // Вестник Башкирского университета. — 2012. — Т. 17. — № 3. — С. 1220–1241.
17. Куренков Е.Л. Нормальная анатомия межпозвонкового диска у человека / Е.Л. Куренков, В.В. Макарова // Журнал анатомии и гистопатологии. — 2017. — Т. 6. — № 3. — С. 117–129.
18. Жарнов А.А. Биомеханические процессы в позвоночно-двигательном сегменте шейного отдела позвоночника при его движении / А.А. Жарнов, О.А. Жарнова // Российский журнал биомеханики. — 2014. — Т. 18. — № 1. — С. 105–118.
19. Vettese J. Collagen molecular organization preservation in human fascia lata and periosteum after tissue engineering / J. Vettese, J. Manon, A. Chretien [et al.] // Front. Bioeng. Biotechnol. — 2024. — Vol. 12. — Art. 1275709. — DOI: 10.3389/fbioe.2024.1275709.
20. Yang H. The pathogenesis and targeted therapies of intervertebral disc degeneration induced by cartilage endplate inflammation / H. Yang, X. Chen, J. Chen [et al.] // Front Cell Dev Biol. — 2024. — № 12. — Art. 1492870. — DOI: 10.3389/fcell.2024.1492870. — PMID: 39687521; PMCID: PMC11647014.



21. Global, regional, and national burden of low back pain, 1990-2020, its attributable risk factors, and projections to 2050: a systematic analysis of the Global Burden of Disease Study 2021 / GBD 2021 Low Back Pain Collaborators // *Lancet Rheumatol.* — 2023. — № 5 (6). — P. e316–e329. — DOI: 10.1016/S2665-9913(23)00098-X. — PMID: 37273833; PMCID: PMC10234592.

22. Hicks G.E. Degenerative lumbar disc and facet disease in older adults: prevalence and clinical correlates / G.E. Hicks, N. Morone, D.K. Weiner // *Spine (Phila Pa 1976)*. — 2009. — № 34 (12). — P. 1301–1306. — DOI: 10.1097/BRS.0b013e3181a18263. — PMID: 19455005; PMCID: PMC2867597.

23. Silagi E.S. Glycosaminoglycan synthesis in the nucleus pulposus: Dysregulation and the pathogenesis of disc degeneration / E.S. Silagi, I.M. Shapiro, M.V. Risbud // *Matrix Biol.* — 2018. — № 71–72. — P. 368–379. — DOI: 10.1016/j.matbio.2018.02.025. Epub 2018 Mar 1. — PMID: 29501510; PMCID: PMC6119535.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Byvaltsev V.A. Degeneratsiya mezhpozvonkovogo diska i vozmozhnosti tkanevoy inzhenerii: obzor literatury [Intervertebral disc degeneration and tissue engineering possibilities: literature review] / V.A. Byvaltsev, I.A. Stepanov, L.A. Bardonova [et al.] // *Khirurgiya pozvonochnika [Spine Surgery]*. — 2017. — Vol. 14. — № 1. — P. 60–67. [in Russian]

2. Adams M.A. Mechanical initiation of intervertebral disc degeneration / M.A. Adams, D.J. Freeman, H.P. Morrison [et al.] // *Spine.* — 2000. — Vol. 25. — P. 1625–1636.

3. Amandusova A.Kh. Fiziko-khimicheskie svoystva i metody kolichestvennogo opredeleniya gialuronovoy kisloty (obzor) [Physicochemical properties and methods of quantitative determination of hyaluronic acid (review)] / A.Kh. Amandusova, K.R. Saveliyeva, A.V. Morozov [et al.] // *Razrabotka i registratsiya lekarstvennykh sredstv [Drug Development & Registration]*. — 2020. — Vol. 9. — № 4. — P. 136–140. [in Russian]

4. Tkachev A.M. Patofiziologicheskie mekhanizmy degeneratsii mezhpozvonkovykh diskov [Pathophysiological mechanisms of intervertebral disc degeneration] / A.M. Tkachev, A.V. Epifanov, E.S. Akarachkova [et al.] // *RMZh. Meditsinskoe obozrenie [RMJ. Medical Review]*. — 2019. — № 4 (II). — P. 72–77. [in Russian]

5. Burikov S.A. Kompyuternyy analiz kolebatelnykh spektrov vodno-etanolnykh rastvorov [Computer analysis of vibrational spectra of water-ethanol solutions] / S.A. Burikov, T.A. Dolenko, I.S. Kurchatov [et al.] // *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Fizika [News from Higher Education Institutions. Physics]*. — 2012. — Vol. 55. — № 4. — P. 38–43. [in Russian]

6. Nechiporenko A.P. Infrakrasnaya Furiye-spektroskopiya v sravnitel'nom issledovanii zhivotnykh i rastitelnykh belkov [Fourier-transform infrared spectroscopy in comparative study of animal and plant proteins] / A.P. Nechiporenko, I.E. Minevich, S.M. Orekhova [et al.] // *Izvestiya vuzov. Prikladnaya khimiya i biotekhnologiya [Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology]*. — 2020. — Vol. 10. — № 4. — P. 678–690. [in Russian]

7. Tripathi G. Seeing the unseen: The role of bioimaging techniques for the diagnostic interventions in intervertebral disc degeneration / G. Tripathi, L. Guha, H. Kumar // *Bone Rep.* — 2024. — Vol. 22. — Art. 101784. — DOI: 10.1016/j.bonr.2024.101784.

8. Patent RU2527909C1. Sposob izmereniya vnutridiskovogo davleniya pri zabolevaniyakh i povrezhdeniyakh pozvonochnika [Method for measuring intradiscal pressure in diseases and injuries of the spine] / Smirnov V.P., Litvinova N.A. — appl. 10.01.2013; publ. 10.09.2014, Bull. № 25. [in Russian]

9. Smirnov V.P. Punktionnaya nukleoplastika pri diskogennoy boli v spine s ispolzovaniem bioaktivnogo kontsentrata melkikh morskikh ryb — ot eksperimental'noy modeli k klinicheskoy praktike [Percutaneous nucleoplasty for discogenic back pain using bioactive concentrate of small marine fish — from experimental model to clinical practice] / V.P. Smirnov, V.P. Zhukov, I.P. Igoshin // *Lechebnoe delo [Medical Care]*. — 2021. — № 4. — P. 104–114. [in Russian]

10. Smirnov V.P. Computer diagnostics system, prediction of the state dynamics and choice of treatment methods for intervertebral discs / V.P. Smirnov, V.P. Zhukov, I.P. Igoshin // The 9th Harbin International Neurosurgical Conference; The 2019 Neuro-interventional Meeting of Chinese Neurosurgical Society; The 2nd Meeting of Neurosurgical Academic of Sino-Russia Medical Universities; The 31st Annual Meeting of the Neurosurgery Association of Heilongjiang Province. — 2019. — P. 69.

11. Smirnov V.P. Maloinvazivnoe lechenie kombinirovannogo diskogennoy bolevoi sindroma poyasnichnogo otdela pozvonochnika [Minimally invasive treatment of combined discogenic pain syndrome of the lumbar spine] / V.P. Smirnov, N.A. Litvinova, V.P. Zhukov [et al.] // XII s'ezd Rossiyskoy Assotsiatsii khirurgov-vertebrologov (RASS): sbornik tezisev [XII Congress of the Russian Association of Spine Surgeons (RASS): abstract book]. — Moscow, 2023. — P. 142. [in Russian]

12. Razaq S. The effect of extracellular pH on matrix turnover by cells of the bovine nucleus pulposus / S. Razaq, R.J. Wilkins, J.P.G. Urban // *Eur Spine J.* — 2003. — Vol. 12. — № 4. — P. 341–349.

13. Ligorio C. Acidic and basic self-assembling peptide and peptide-graphene oxide hydrogels: characterisation and effect on encapsulated nucleus pulposus cells / C. Ligorio, A. Vijayaraghavan, J.A. Hoyland [et al.] // *Acta Biomater.* — 2022. — Vol. 143. — P. 145–158.

14. Zöllner J. Determination of hyaluronic acid in the nucleus pulposus in acute and chronic degenerative intervertebral disk changes / J. Zöllner, T. Sancaktaroglu, A. Meurer [et al.] // *Z Orthop Ihre Grenzgeb.* 1999. — Vol. 137. — № 3. — P. 211.

15. Zagorulko Yu.Yu. Osobennosti rastvorov gialuronovoy kisloty dlya vnutrisustavnogo vvedeniya i sovremennye tendentsii v ikh razrabotke (obzor) [Features of hyaluronic acid solutions for intra-articular administration and current trends in their development (review)] / Yu.Yu. Zagorulko, E.Yu. Zagorulko // *Razrabotka i registratsiya lekarstvennykh sredstv [Drug Development & Registration]*. — 2020. — Vol. 9. — № 2. — P. 45–55. [in Russian]



16. Sigaeva N.N. Khimicheskaya modifikatsiya gialuronovoy kisloty i ee primeneniye v meditsine [Chemical modification of hyaluronic acid and its application in medicine] / N.N. Sigaeva, S.V. Kolesov, P.V. Nazarov [et al.] // Vestnik Bashkirskogo universiteta [Bulletin of Bashkir University]. — 2012. — Vol. 17. — № 3. — P. 1220–1241. [in Russian]
17. Kurenkov E.L. Normalnaya anatomiya mezhpozvonkovogo diska u cheloveka [Normal anatomy of the human intervertebral disc] / E.L. Kurenkov, V.V. Makarova // Zhurnal anatomii i gistopatologii [Journal of Anatomy and Histopathology]. — 2017. — Vol. 6. — № 3. — P. 117–129. [in Russian]
18. Zharnov A.A. Biomekhanicheskie protsessy v pozvonочно-dvigatel'nom segmente sheynogo otdela pozvonochnika pri ego dvizhenii [Biomechanical processes in the spinal motion segment of the cervical spine during its movement] / A.A. Zharnov, O.A. Zharnova // Rossiyskiy zhurnal biomekhaniki [Russian Journal of Biomechanics]. — 2014. — Vol. 18. — № 1. — P. 105–118. [in Russian]
19. Vettese J. Collagen molecular organization preservation in human fascia lata and periosteum after tissue engineering / J. Vettese, J. Manon, A. Chretien [et al.] // Front. Bioeng. Biotechnol. — 2024. — Vol. 12. — Art. 1275709. — DOI: 10.3389/fbioe.2024.1275709.
20. Yang H. The pathogenesis and targeted therapies of intervertebral disc degeneration induced by cartilage endplate inflammation / H. Yang, X. Chen, J. Chen [et al.] // Front Cell Dev Biol. — 2024. — № 12. — Art. 1492870. — DOI: 10.3389/fcell.2024.1492870. — PMID: 39687521; PMCID: PMC11647014.
21. Global, regional, and national burden of low back pain, 1990–2020, its attributable risk factors, and projections to 2050: a systematic analysis of the Global Burden of Disease Study 2021 / GBD 2021 Low Back Pain Collaborators // Lancet Rheumatol. — 2023. — № 5 (6). — P. e316–e329. — DOI: 10.1016/S2665-9913(23)00098-X. — PMID: 37273833; PMCID: PMC10234592.
22. Hicks G.E. Degenerative lumbar disc and facet disease in older adults: prevalence and clinical correlates / G.E. Hicks, N. Morone, D.K. Weiner // Spine (Phila Pa 1976). — 2009. — № 34 (12). — P. 1301–1306. — DOI: 10.1097/BRS.0b013e3181a18263. — PMID: 19455005; PMCID: PMC2867597.
23. Silagi E.S. Glycosaminoglycan synthesis in the nucleus pulposus: Dysregulation and the pathogenesis of disc degeneration / E.S. Silagi, I.M. Shapiro, M.V. Risbud // Matrix Biol. — 2018. — № 71–72. — P. 368–379. — DOI: 10.1016/j.matbio.2018.02.025. Epub 2018 Mar 1. — PMID: 29501510; PMCID: PMC6119535.