

УДК 616.832-07

ИННОВАЦИОННЫЕ МЕТОДЫ ДИАГНОСТИКИ БОЛЕЙ В ПОЯСНИЦЕ (ОБЗОР)

Болат Н.Б., Нуралиева А.Е., Калыбаева У.А., Отарбаева М.Б., Григолашвили М.А.,
Баттакова Ш.Б.

Кафедра неврологии, психиатрии и реабилитологии, НАО «Медицинский университет Караганды», г. Караганда, Республика Казахстан

Боль в пояснице является распространенной проблемой опорно-двигательного аппарата, которая значительно ухудшает качество жизни и приводит к снижению трудоспособности. Сложность диагностики данного состояния обусловлена многообразием возможных причин, таких как дегенеративные изменения позвоночника, травмы, воспалительные процессы и другие патологические состояния. В связи с этим существует острая необходимость в разработке и внедрении инновационных подходов к диагностике болей в поясничном отделе позвоночника.

В данном обзоре рассматриваются современные методы диагностики БП, такие как машинное обучение, МР-нейрография, МР-спектроскопия, 3D-DESS и КТ-миелография. Машинное обучение позволяет анализировать большие объемы данных и выявлять скрытые закономерности, что способствует более точной постановке диагноза. МР-нейрография и МР-спектроскопия предоставляют детализированное изображение нервных структур и биохимических процессов, что помогает выявить неврологические причины болей. 3D-DESS метод позволяет получать высококачественные изображения суставов и позвоночника, что важно для выявления структурных изменений. КТ-миелография используется для детального исследования спинного мозга и его оболочек.

Анализируются преимущества и ограничения каждого метода, а также возможности их комбинированного применения. Обсуждаются алгоритмы обследования пациентов с БП, включающие последовательное использование различных методов для получения наиболее полной диагностической картины. Также рассматриваются перспективы развития инновационных методов диагностики, таких как интеграция искусственного интеллекта и разработка новых технологий визуализации.

Представленная информация может быть полезна для неврологов, нейрохирургов, ортопедов, терапевтов и других специалистов, занимающихся диагностикой и

лечением болей в поясничном отделе позвоночника. Разработка эффективных диагностических алгоритмов и методов имеет важное значение для повышения качества медицинской помощи и улучшения качества жизни пациентов с болью в пояснице.

Ключевые слова: боль в пояснице, машинное обучение, магнитно-резонансная томография, нейровизуализация, компьютерная томография, миелография, инновации, диагностика.

Для цитирования: Болат Н.Б., Нуралиева А.Е., Калыбаева У.А., Отарбаева М.Б., Григолашвили М.А., Баттакова Ш.Б. Инновационные методы диагностики болей в пояснице (обзор). Медицина труда и экология человека. 2024; 3: 17-41.

Для корреспонденции: Болат Назира Бахтияркызы – НАО «Медицинский университет Караганды». 100008, Республика Казахстан, г. Караганда, ул. Гоголя, 40. e-mail: nazira_03.05@mail.ru

Финансирование: исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов: авторы данной статьи сообщают об отсутствии конфликта интересов.

DOI: <http://dx.doi.org/10.24412/2411-3794-2024-10302>

INNOVATIVE METHODS FOR DIAGNOSING LOW BACK PAIN (A REVIEW)

Bolat N.B., Nuralieva A.E., Kalybaeva U.A., Otarbaeva M.B., Grigolashvili M.A., Battakova Sh.B.

Department of Neurology, Psychiatry and Rehabilitation, Karaganda Medical University, Karaganda, Republic of Kazakhstan

Low back pain is a common musculoskeletal problem that significantly impairs quality of life and leads to reduced work capacity. The complexity of diagnosing this condition is due to the variety of possible causes, such as degenerative changes in the spine, injuries, inflammatory processes, and other pathological conditions. Therefore, there is an urgent need to develop and implement innovative approaches to the diagnosis of low back pain.

This review discusses modern methods for diagnosing LBP, such as machine learning, MR neurography, MR spectroscopy, 3D-DESS, and CT myelography. Machine learning allows you to analyze large amounts of data and identify hidden patterns, which contributes to a more accurate diagnosis. MR neurography and MR spectroscopy

provide a detailed picture of neural structures and biochemical processes, which helps to identify the neurological causes of pain. The 3D-DESS method allows you to obtain high-quality images of the joints and spine, which is important for identifying structural changes. CT myelography is used for a detailed examination of the spinal cord and its membranes.

The advantages and limitations of each method, as well as the possibilities of their combined use, are analyzed. Algorithms for examining patients with LBP are discussed, including the sequential use of various methods to obtain the most complete diagnostic picture. The prospects for the development of innovative diagnostic methods, such as the integration of artificial intelligence and the development of new visualization technologies, are also considered.

The information presented may be useful for neurologists, neurosurgeons, orthopedists, therapists, and other specialists involved in the diagnosis and treatment of low back pain. The development of effective diagnostic algorithms and methods is important for improving the quality of medical care and improving the quality of life of patients with low back pain.

Keywords: low back pain; machine learning; magnetic resonance imaging; magnetic resonance neurography; magnetic resonance spectroscopy; tomography, x-ray computed; myelography; innovations; diagnostic

For citation: Bolat N. B., Nuralieva A. E., Kalybaeva U. A., Otarbaeva M. B., Grigolashvili M. A, Battakova Sh. B. Innovative methods for diagnosing low back pain (a review). Occupational health and human ecology. 2024; 3: 17-41.

Correspondence: Bolat Nazira Bakhtiyarkyzy – NCJSC “Medical University of Karaganda” (100008, Republic of Kazakhstan, Karaganda, Gogol St., 40; e-mail: nazira_03.05@mail.ru)

Funding: The study had no financial support.

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

DOI: <http://dx.doi.org/10.24412/2411-3794-2024-10302>

Боль в пояснице (БП), или люмбагия, представляет собой распространенную проблему опорно-двигательного аппарата, которая значительно ограничивает повседневную активность и снижает трудоспособность [1]. БП может быть острой (длительностью до 6 недель), подострой (от 6 до 12 недель) или хронической

(более 12 недель) [18]. Она может быть вызвана повреждением мышц, связок, межпозвонковых дисков или суставов позвоночника, а также ноцицептивной (активацией болевых рецепторов) или нейропатической (повреждением нервной системы) природой [18]. Ноцицептивная боль обычно описывается как тупая или ноющая, в то время как нейропатическая - как жгучая или стреляющая. Боль усиливается при движении, физической нагрузке или длительном пребывании в одной позе [18].

Дегенеративные изменения позвоночника, такие как остеохондроз и спондилоартроз, являются наиболее распространенными причинами БП, особенно у людей старше 40 лет [18]. Грыжи межпозвонковых дисков, стеноз позвоночного канала, спондилолистез, травмы позвоночника, воспалительные заболевания (например, болезнь Бехтерева) и инфекции также часто вызывают БП [18]. В некоторых случаях причина боли остается неизвестной, и тогда речь идет о неспецифической боли в пояснице [18].

БП является одной из основных причин ограничения активности и прогулов, что создает значительную медицинскую нагрузку и экономические издержки [2, 3, 4, 5]. В 2013 году 20% всех зарегистрированных заболеваний, связанных с работой, были связаны с нарушениями опорно-двигательного аппарата, причем дорсопатии поясницы были наиболее частой причиной инвалидности среди взрослых граждан Чехии [9]. БП часто приводит к отсутствию на работе и досрочному выходу на пенсию, особенно среди специалистов по уходу за больными, из которых около 12% ежегодно выходят на пенсию из-за травм спины [9].

Согласно исследованиям Erdem et al. (2018) и Donelson et al. (2012), точечная распространенность БП колеблется от 1 до 58% (в среднем 18,1%), годовая распространенность - от 0,8 до 82,5% (в среднем 38,1%), а пожизненная - от 11 до 84% (в среднем 47,1%) [12, 13]. Спортсмены, занимающиеся лыжами, греблей, гольфом, волейболом, легкой атлетикой, плаванием или гимнастикой, подвержены большему риску БП [4, 10, 11, 12, 13, 14, 15]. Заболеваемость БП среди спортсменов достигает 30%, а среди молодых и элитных спортсменов варьируется от 66% до 88,5% [15].

Диагностика БП сложна из-за многообразия причин, включая дегенеративные изменения, воспалительные процессы и травмы [17]. Традиционные методы диагностики, такие как рентгенография, КТ и МРТ, имеют свои ограничения, особенно в выявлении ранних стадий заболеваний и оценке функционального состояния позвоночника [18]. Необходимы инновационные подходы к диагностике

БП, которые повысили бы точность выявления причин боли и оптимизировали бы выбор тактики лечения [19]. Это может включать использование новых биомаркеров, функциональных тестов и интеграцию данных различных методов исследования [20].

Экономическое бремя БП значительное. В США ежегодные расходы на лечение БП составляют 90 миллиардов долларов [5], включая прямые медицинские и непрямые расходы. Разработка новых, более эффективных методов диагностики и лечения БП поможет снизить эти расходы. Инновационные методы, такие как машинное обучение (МО), МР-нейрография, МР-спектроскопия, 3D-DESS (Double Echo Steady State (метод магнитно-резонансной томографии)) и КТ-миелография, могут сыграть ключевую роль в этом процессе [19, 20]. Они позволяют выбрать наиболее эффективные методы лечения, сократить количество ненужных диагностических процедур и предотвратить развитие хронической боли.

Внедрение этих инноваций в клиническую практику улучшит качество медицинской помощи пациентам с БП и снизит социально-экономическое бремя этого заболевания.

Цель обзора: провести критическую оценку и систематизацию данных о применении инновационных методов диагностики болей в поясничном отделе позвоночника в неврологии и нейрохирургии, выявить их преимущества и ограничения, определить перспективы развития и место в современной клинической практике.

Методология. Поиск источников осуществлялся в базах данных PubMed, Web of Science и Scopus. Критериями включения являлись публикации на английском и русском языках, опубликованные преимущественно не ранее 2019 года, посвященные применению машинного обучения, МР-нейрографии, МР-спектроскопии, 3D-DESS и КТ-миелографии в диагностике болей в пояснице. Были исключены публикации, не относящиеся к теме обзора, а также исследования на животных.

Для анализа отобранных публикаций использовались методы качественного анализа, такие как систематизация, обобщение и сравнение данных. Особое внимание уделялось оценке чувствительности, специфичности и точности методов диагностики, а также их преимуществам и ограничениям.

Результаты обзора представлены в виде систематизированного описания каждого метода, включая его физические принципы, возможности визуализации, применение в диагностике патологий позвоночника и нервных корешков, а также

преимущества и ограничения. Кроме того, обсуждаются алгоритмы обследования пациентов с болями в пояснице с использованием инновационных методов и перспективы их комбинированного применения.

Результаты.

I. МАШИННОЕ ОБУЧЕНИЕ В ДИАГНОСТИКЕ

Машинное обучение (МО) – это раздел искусственного интеллекта, который позволяет компьютерам обучаться на основе данных и делать прогнозы или принимать решения [21]. В контексте диагностики боли в пояснице, МО может анализировать различные данные, такие как медицинские изображения (рентген, МРТ), результаты клинических исследований, генетическую информацию и данные носимых устройств [22, 23, 24].

МО опирается на такие дисциплины, как информатика, физика, анатомия и физиология. Информатика предоставляет алгоритмы и методы для анализа данных и построения моделей. Физика лежит в основе методов визуализации, таких как рентген и МРТ. Анатомия и физиология необходимы для понимания структуры и функции позвоночника, а также механизмов возникновения боли.

Принципы машинного обучения

1. Обучение с учителем (Supervised Learning): алгоритмы обучаются на размеченных данных, где известны правильные ответы (например, диагнозы пациентов). Цель - научиться предсказывать результаты для новых данных [25]. Этот подход применим, когда имеется достаточно данных с подтвержденными диагнозами болей в пояснице.
2. Обучение без учителя (Unsupervised Learning): алгоритмы работают с неразмеченными данными, выявляя скрытые структуры и паттерны [25]. Это может быть полезно для выявления новых подтипов болей в пояснице или групп пациентов с похожими характеристиками.
3. Полуавтоматическое обучение (Semi-supervised Learning): комбинирует оба подхода, используя как размеченные, так и неразмеченные данные [25, 26]. Это полезно, когда имеется ограниченное количество размеченных данных и много неразмеченных.
4. Обучение с подкреплением (Reinforcement Learning): алгоритм обучается путем взаимодействия с окружающей средой, получая награды за правильные действия [26]. В контексте диагностики боли в пояснице этот подход может оптимизировать процесс диагностики.

Алгоритмы машинного обучения

1. Классификация: задача отнесения объекта к одной из predeterminedных категорий (например, тип боли в пояснице) [25, 32, 33]. Широко используются такие алгоритмы, как метод опорных векторов (SVM), деревья решений и случайный лес [26].
2. Регрессия: задача предсказания непрерывного значения (например, интенсивности боли) на основе входных данных [25]. Примеры включают линейную и полиномиальную регрессию [27].
3. Кластеризация: задача группировки объектов на основе их сходства [25]. Это полезно для выявления групп пациентов с похожими характеристиками боли. Используются алгоритмы k-средних и иерархическая кластеризация [27].
4. Глубокое обучение (Deep Learning): подход, основанный на использовании нейронных сетей с большим количеством слоев. Это позволяет выявлять сложные зависимости в данных и полезно для анализа медицинских изображений [28, 29, 30, 31].

Применение МО для анализа клинических данных и составления диагностических алгоритмов

ИИ используется для анализа клинических данных и разработки диагностических алгоритмов при болях в пояснице (БП). МО позволяет классифицировать пациентов, выявлять патологии позвоночника и прогнозировать тяжесть БП.

1. Классификация пациентов: модели МО могут классифицировать пациентов с высокой точностью на основе кинематических или биомеханических измерений. Например, глубокая нейронная сеть LSTM диагностировала БП с точностью 97,2% [37], а метод опорных векторов (SVM) оценивал БП с точностью 96% [38].
2. Выявление патологий позвоночника: МО помогает в выявлении патологий, таких как дегенерация межпозвонковых дисков и стеноз позвоночного канала. Например, классификатор Random Forest достиг средней точности 94,7% в классификации дисков на здоровые, выпячивающиеся и дегенерировавшие [39].
3. Прогнозирование тяжести БП: МО используется для прогнозирования тяжести БП. Например, нейронная сеть прямого распространения достигла погрешности в оценке интенсивности боли в 4% [41].

Преимущества и ограничения МО в диагностике БП

Преимущества:

- Точность: системы ИИ могут классифицировать пациентов с БП с точностью более 80% и точно определять различные типы дегенеративных изменений позвоночника [42, 45].
- Персонализация: МО анализирует различные источники данных для прогнозирования интенсивности боли и факторов риска хронизации боли, позволяя индивидуализировать диагностику и лечение [43].

Ограничения:

- Качество данных: для обучения моделей МО необходимы большие и разнообразные наборы данных. Недостаточное количество данных или их низкое качество могут снизить точность диагностики [44].
- Интерпретация: сложные модели МО, такие как глубокие нейронные сети, могут затруднять понимание того, как система пришла к определенному диагнозу, что может вызывать сомнения у врачей [42].

МО имеет потенциал значительно улучшить диагностику и лечение БП. Однако для полной реализации этого потенциала необходимо решить проблемы, связанные с качеством данных и интерпретацией результатов.

II. МР-НЕЙРОГРАФИЯ И МР-СПЕКТРОСКОПИЯ

Магнитно-резонансная нейрография (МРН) – это специализированный метод магнитно-резонансной томографии (МРТ), разработанный для визуализации периферических нервов с высоким разрешением [46]. МРН позволяет оценить состояние нервов, выявить наличие патологий, таких как компрессия, воспаление, отек или повреждение [46, 49]. Физические принципы МРН основаны на использовании специальных последовательностей импульсов, которые подавляют сигналы от окружающих тканей (жира, мышц, сосудов), выделяя сигнал от нервной ткани [46]. Дополнительное применение диффузионно-взвешенных последовательностей позволяет выявить нарушения микроструктуры нерва, связанные с изменением направления диффузии молекул воды [47].

Магнитно-резонансная спектроскопия (МРС) – это неинвазивный метод визуализации, который позволяет оценить химический состав тканей, в частности межпозвоночных дисков [49]. МРС измеряет уровни различных метаболитов, таких как лактат, хондроитинсульфат, коллаген и другие, которые могут свидетельствовать о наличии дегенеративных изменений и воспаления в тканях

[49]. Физические принципы МРС основаны на явлении ядерного магнитного резонанса (ЯМР). Атомы водорода в разных молекулах имеют уникальные резонансные частоты, которые зависят от их химического окружения. Анализ этих сигналов позволяет определить концентрацию различных метаболитов в тканях и оценить их состояние.

Применение МРН и МРС в диагностике патологий позвоночника

Магнитно-резонансная нейрография (МРН):

- Визуализация нервных корешков: МРН позволяет оценить состояние нервных корешков, выявить их компрессию или раздражение, что может быть причиной болей в поясничном отделе позвоночника [46, 48].
- Диагностика грыж межпозвоночных дисков: МРН помогает определить наличие грыжи диска и ее воздействие на нервные корешки [46, 48].
- Оценка стеноза позвоночного канала: МРН может быть использована для визуализации сужения позвоночного канала и оценки его влияния на нервные структуры [49].
- Диагностика опухолей и других патологий: МРН позволяет выявить опухоли периферических нервов, такие как невриномы и шванномы, а также другие патологические изменения [49].

Диффузионно-взвешенная МР-нейрография (ДВ-МРН):

- Оценка степени повреждения нерва: ДВ-МРН позволяет определить степень и характер повреждения нерва (например, отек, демиелинизация, аксональное повреждение) [47].
- Ранняя диагностика компрессии нервных корешков: ДВ-МРН может выявить признаки компрессии нервных корешков на ранних стадиях, когда структурные изменения еще не заметны на обычной МРТ [48].
- Мониторинг эффективности лечения: ДВ-МРН может использоваться для оценки динамики изменений в нервной ткани в процессе лечения.

Магнитно-резонансная спектроскопия (МРС):

- Выявление дискогенной боли: МРС позволяет измерить уровень лактата и других метаболитов, связанных с воспалением и

дегенерацией диска, что может указывать на наличие дискогенной боли [49].

- Оценка степени дегенерации диска: МРС позволяет количественно оценить уровень протеогликанов и коллагена в диске, что отражает степень его дегенерации [49].
- Прогнозирование результатов лечения: МРС может помочь в выборе оптимальной тактики лечения и прогнозировании результатов хирургического вмешательства при болях в пояснице [49].

Преимущества и ограничения МРН и МРС

Преимущества:

- Высокая чувствительность и специфичность: МРН и МРС позволяют выявить патологические изменения в нервной ткани и межпозвоночных дисках с высокой точностью. МРС может идентифицировать болезненные диски с чувствительностью 82% и специфичностью 88% [50].
- Неинвазивность: оба метода являются неинвазивными, что исключает риск осложнений, связанных с инвазивными процедурами [46, 50].
- Ранняя диагностика: ДВ-МРН позволяет выявить изменения в нервной ткани на ранних стадиях, что способствует своевременному началу лечения и улучшению прогноза [47, 48].
- Количественная оценка: МРС предоставляет количественные данные о состоянии межпозвоночных дисков, что позволяет объективно оценить степень дегенерации и выбрать оптимальную тактику лечения [50].
- Прогнозирование результатов лечения: МРС может помочь предсказать результаты хирургического вмешательства, что позволяет индивидуализировать подход к лечению [50].

Ограничения:

- Стоимость: МРН и МРС являются дорогостоящими методами исследования, что может ограничивать их доступность для пациентов [46].

- Доступность: не во всех медицинских учреждениях есть необходимое оборудование и специалисты для проведения МРН и МРС [46].
- Технические ограничения: МРС требует высокой квалификации персонала для правильной интерпретации результатов. Наличие металлических имплантатов у пациента может ограничивать возможности МРТ [47].

МРН и МРС являются ценными инструментами в диагностике патологий позвоночника и нервных корешков. Они предоставляют дополнительную информацию о состоянии нервной ткани, которую не всегда можно получить с помощью других методов визуализации. Это позволяет более точно диагностировать причину боли в поясничном отделе позвоночника и выбрать наиболее эффективную тактику лечения, тем самым улучшая качество медицинской помощи и снижая социально-экономическое бремя заболеваний позвоночника.

III. 3D-DESS И КТ-МИЕЛОГРАФИЯ

3D-DESS (Double Echo Steady State) – это метод магнитно-резонансной томографии (МРТ), использующий специальные последовательности импульсов для получения трехмерных изображений позвоночника с высоким разрешением [51].

Этот метод позволяет детально визуализировать нервные корешки, межпозвоночные диски, связки и другие структуры позвоночного канала [51].

Физические принципы 3D-DESS основаны на использовании градиентных эхо-последовательностей с двумя эхо-сигналами [51]. Первый эхо-сигнал имеет короткое время (TE) и высокое отношение сигнал/шум, что обеспечивает хорошую визуализацию анатомических структур. Второй эхо-сигнал имеет более длительное TE и чувствителен к жидкостям, что позволяет выявить отек и другие патологические изменения в тканях [51]. Комбинация этих двух эхо-сигналов позволяет получить изображения с высокой детализацией и контрастностью.

На ранних стадиях заболеваний позвоночника 3D-DESS может выявить незначительные изменения в структуре межпозвоночных дисков, такие как начальные признаки дегенерации или протрузии, которые могут быть не видны на обычных МРТ-изображениях [51]. Это позволяет начать лечение на ранней стадии и предотвратить развитие более серьезных осложнений. На поздних стадиях 3D-DESS позволяет точно определить размер и локализацию грыжи диска, оценить степень компрессии нервных корешков и выявить другие патологические

изменения в позвоночнике, что помогает в выборе оптимальной тактики лечения [51].

КТ-миелография – это комбинированный метод визуализации, который сочетает в себе компьютерную томографию (КТ) и миелографию (рентгенологическое исследование с введением контрастного вещества в спинномозговой канал) [53]. Этот метод позволяет получить детальные изображения позвоночного канала, спинного мозга и нервных корешков, что особенно важно для диагностики стеноза позвоночного канала и компрессии нервных корешков [53, 58].

Физические принципы КТ-миелографии основаны на использовании рентгеновского излучения для создания изображений [53]. Контрастное вещество, введенное в спинномозговой канал, позволяет выделить его на фоне окружающих тканей и оценить его проходимость [53]. КТ-сканирование обеспечивает получение поперечных срезов позвоночника, которые затем могут быть реконструированы в трехмерные изображения.

На ранних стадиях заболеваний позвоночника КТ-миелография может выявить незначительные сужения позвоночного канала и компрессию нервных корешков, что позволяет оперативно начать лечение и предотвратить развитие неврологических осложнений [55]. На поздних стадиях КТ-миелография позволяет точно определить степень стеноза позвоночного канала, локализацию и размер грыжи диска, а также оценить состояние нервных корешков, что помогает в выборе оптимальной тактики лечения, включая хирургическое вмешательство [53, 58].

Применение 3D-DESS и КТ-миелографии в диагностике патологий позвоночника

3D-DESS:

- Диагностика дегенеративных изменений: 3D-DESS позволяет выявлять начальные признаки дегенерации межпозвоночных дисков и протрузии [51].
- Оценка компрессии нервных корешков: этот метод обеспечивает детальную визуализацию нервных корешков и их взаимодействие с грыжей диска [51].
- Оценка костных изменений: 3D-DESS также может использоваться для оценки переломов и отека костного мозга в области межсуставной части позвоночника [52].

КТ-миелография:

- Оценка проходимости позвоночного канала: КТ-миелография позволяет оценить степень стеноза позвоночного канала и выявить сдавление нервных корешков [53, 55].
- Диагностика грыж межпозвоночных дисков: этот метод дает возможность точно определить наличие и размер грыжи диска, а также ее влияние на нервные структуры [58].
- Использование при противопоказаниях к МРТ: КТ-миелография особенно полезна для пациентов с металлическими имплантатами или кардиостимуляторами, которые не могут пройти МРТ [54].

Преимущества и ограничения методов

3D-DESS, преимущества:

- Высокая детализация: обеспечивает четкую визуализацию нервных корешков и их взаимосвязь с грыжей межпозвоночного диска [51, 52].
- Точность: превосходит традиционную МРТ и КТ в диагностике сложных случаев, таких как фораминальные и экстрафораминальные грыжи дисков [51, 52].

3D-DESS, ограничения:

- Высокая стоимость: 3D-DESS является дорогостоящим методом исследования, что может ограничить его доступность [51].

КТ-миелография, преимущества:

- Высокая точность: превосходит МРТ в выявлении стеноза позвоночного канала и сдавления нервных корешков, особенно в сложных случаях [53, 54, 55].
- Детализация: обеспечивает детальную визуализацию костных структур и патологий, таких как остеофиты и переломы [56].

КТ-миелография, ограничения:

- Инвазивность: требует введения контрастного вещества в субарахноидальное пространство, что связано с риском осложнений [53].
- Лучевая нагрузка: связана с лучевой нагрузкой, что ограничивает применение у некоторых пациентов, особенно у молодых [57].

3D-DESS и КТ-миелография являются ценными инструментами в диагностике заболеваний позвоночника. 3D-DESS обеспечивает высокую детализацию и точность в диагностике сложных случаев, однако является дорогостоящим методом. КТ-миелография, обладая высокой точностью в выявлении стеноза позвоночного канала и сдавления нервных корешков, полезна для пациентов с противопоказаниями к МРТ, но является инвазивной процедурой с лучевой нагрузкой. Выбор между этими методами зависит от конкретной клинической ситуации, доступности методов и индивидуальных особенностей пациента.

Обсуждение.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ. Инновационные методы диагностики болей в поясничном отделе позвоночника значительно расширили возможности врачей в определении причин и выборе оптимального лечения. Каждый из рассмотренных методов обладает своими уникальными преимуществами и ограничениями, что делает их ценными инструментами в арсенале современной медицины.

Чувствительность, специфичность, точность являются важными показателями эффективности диагностических методов.

Машинное обучение (МО): в исследовании Dhall et al. (2019), посвященном применению МО для диагностики болей в пояснице, сообщалось о высокой точности (более 80%), но конкретные показатели чувствительности и специфичности варьируются в зависимости от используемых алгоритмов и данных [30]. Некоторые исследования показывают, что модели МО могут классифицировать пациентов с болью в пояснице (БП) и без нее с точностью более 95% [35, 36, 37].

МР-нейрография (МРН): МРН обладает высокой чувствительностью и специфичностью в выявлении компрессии, воспаления и других повреждений нервов [46, 49]. Для диффузионно-взвешенной МРН (ДВ-МРН) также сообщалось о высокой чувствительности в выявлении ранних изменений нервной ткани [47, 48].

МР-спектроскопия (МРС): МРС может идентифицировать болезненные диски с высокой чувствительностью (82%) и специфичностью (88%), особенно при отсутствии грыжи диска [50]. Это делает МРС ценным инструментом для диагностики дискогенной боли.

3D-DESS: метод превосходит традиционную МРТ и КТ в диагностике сложных случаев, таких как грыжи межпозвоночного диска внутри и снаружи

межпозвоночного отверстия, а также у пациентов с деформацией позвоночника [51, 52]. Однако конкретные показатели чувствительности, специфичности и точности 3D-DESS в литературе не приводятся.

КТ-миелография: превосходит МРТ в выявлении стеноза позвоночного канала и выявлении сдавления нервных корешков, особенно в случаях, когда МРТ-данные неоднозначны или не соответствуют клиническим проявлениям [53, 54, 55]. Тем не менее конкретные показатели чувствительности, специфичности и точности КТ-миелографии в литературе не приводятся.

В целом инновационные методы диагностики болей в поясничном отделе позвоночника, такие как МО, МРН, МРС, 3D-DESS и КТ-миелография, демонстрируют высокую чувствительность и специфичность. Однако для некоторых методов, таких как 3D-DESS и КТ-миелография, конкретные показатели в литературе не приводятся, и необходимы дальнейшие исследования для их оценки.

Инвазивность, безопасность, доступность являются важными факторами при выборе метода диагностики болей в поясничном отделе позвоночника.

Машинное обучение (МО): метод является неинвазивным и безопасным, поскольку он основан на анализе данных, полученных с помощью других методов визуализации или клинических исследований [26, 28, 35]. Доступность МО зависит от наличия соответствующего программного обеспечения и специалистов, способных интерпретировать результаты.

МР-нейрография (МРН) и МР-спектроскопия (МРС): оба метода являются неинвазивными и безопасными, поскольку они не требуют введения каких-либо веществ или инструментов в организм пациента [46, 50]. Доступность этих методов может быть ограничена высокой стоимостью оборудования и необходимостью наличия квалифицированных специалистов.

3D-DESS: метод также является неинвазивным и безопасным, поскольку он основан на стандартной МРТ [51]. Доступность 3D-DESS может быть ограничена высокой стоимостью и необходимостью наличия современного оборудования.

КТ-миелография: метод является инвазивным, поскольку требует введения контрастного вещества в субарахноидальное пространство позвоночника [53]. Это связано с определенными рисками, такими как головная боль, тошнота и аллергические реакции. Кроме того, КТ-миелография связана с лучевой нагрузкой, что ограничивает ее применение, особенно у молодых пациентов [57].

Таким образом, МО, МРН и МРС являются предпочтительными методами с точки зрения инвазивности и безопасности. Однако доступность этих методов может быть ограничена стоимостью и необходимостью наличия специального оборудования и квалифицированных специалистов. КТ-миелография, несмотря на свою инвазивность и лучевую нагрузку, может быть полезна в случаях, когда МРТ противопоказана или недоступна.

Стоимость, экономическая эффективность методов диагностики болей в пояснице являются важными факторами, влияющими на их доступность и применение в клинической практике.

Машинное обучение (МО), несмотря на свою высокую точность и персонализированный подход, требует значительных инвестиций в разработку и внедрение программного обеспечения, а также в обучение специалистов [26]. Однако в долгосрочной перспективе МО может снизить затраты на диагностику за счет автоматизации некоторых процессов и сокращения времени, затрачиваемого врачами на анализ данных [35].

МР-нейрография и МР-спектроскопия являются дорогостоящими методами исследования, что ограничивает их доступность для пациентов и медицинских учреждений [46, 50]. Но высокая точность и информативность этих методов может оправдать их стоимость, особенно в сложных случаях, когда другие методы диагностики не дают однозначных результатов [46, 50].

3D-DESS также является дорогостоящим методом, что может быть препятствием для его широкого применения [51]. Тем не менее его высокая точность в диагностике сложных случаев может оправдать затраты, особенно если учесть, что ранняя и точная диагностика может привести к более эффективному лечению и снижению затрат на долгосрочную реабилитацию [51].

КТ-миелография, хотя и менее дорогая, чем МРТ-методы, также требует определенных затрат на проведение процедуры и анализ результатов [53]. Однако в некоторых случаях, когда МРТ противопоказана, КТ-миелография может быть единственным доступным методом точной диагностики [53].

В целом экономическая эффективность инновационных методов диагностики болей в поясничном отделе позвоночника должна оцениваться с учетом не только прямых затрат на проведение исследования, но и долгосрочных выгод, связанных с более точной диагностикой, выбором оптимального лечения и снижением риска осложнений.

ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНАЯ ДИАГНОСТИКА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИННОВАЦИОННЫХ МЕТОДОВ. В контексте диагностики болей в поясничном отделе позвоночника инновационные методы, такие как машинное обучение (МО), магнитно-резонансная нейрография (МРН), магнитно-резонансная спектроскопия (МРС), 3D-DESS и КТ-миелография, предлагают новые возможности для дифференциальной диагностики.

Машинное обучение позволяет анализировать большие объемы данных, включая результаты визуализации, клинические данные и генетическую информацию, для выявления скрытых закономерностей и классификации пациентов [22, 23, 24]. Это может быть полезно для дифференциации различных причин болей в пояснице, таких как дискогенная боль, спондилогенная боль, радикулопатия и другие.

МР-нейрография и МР-спектроскопия предоставляют детальную информацию о состоянии нервных структур и межпозвоночных дисков [46, 47, 48, 49, 50]. МРН позволяет визуализировать нервные корешки и определить наличие их компрессии или воспаления, что может быть причиной боли. МРС позволяет оценить химический состав межпозвоночных дисков и выявить признаки дегенерации, такие как снижение уровня протеогликанов и повышение уровня лактата.

3D-DESS и КТ-миелография являются эффективными методами визуализации позвоночника и спинного мозга, позволяющими выявить такие патологии, как грыжи дисков, стеноз позвоночного канала и другие дегенеративные изменения [51, 52, 53, 54, 55, 56]. 3D-DESS обладает высокой детализацией и точностью, особенно в сложных случаях (фораминальные и экстрафораминальные грыжи дисков), а также у пациентов с деформацией позвоночника [51, 52]. КТ-миелография, в свою очередь, превосходит МРТ в выявлении стеноза позвоночного канала и сдавления нервных корешков, особенно в случаях, когда МРТ-данные неоднозначны [53, 54, 55].

Комбинированное применение этих методов может значительно повысить точность дифференциальной диагностики болей в поясничном отделе позвоночника. Например, машинное обучение может быть использовано для анализа данных МРН и МРС, что позволит создать более точные диагностические алгоритмы [59]. 3D-DESS и КТ-миелография могут дополнять друг друга, предоставляя информацию о состоянии как мягких тканей и нервных структур, так и костных структур позвоночника [56].

КЛИНИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ.

I. ВЫБОР МЕТОДА ДИАГНОСТИКИ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ КЛИНИЧЕСКОЙ КАРТИНЫ И ЦЕЛЕЙ ИССЛЕДОВАНИЯ.

- Машинное обучение (МО) может быть полезно в качестве инструмента скрининга для выявления пациентов с высоким риском болей в пояснице, а также для прогнозирования тяжести и хронизации боли. Этот метод может помочь в персонализации лечения и выборе оптимальной терапии [22, 23, 24].
- МР-нейрография рекомендуется при подозрении на компрессию или повреждение нервных корешков, например, при радикулопатии или стенозе позвоночного канала. Этот метод позволяет визуализировать нервы и оценить степень их повреждения [46, 47, 48, 49].
- МР-спектроскопия может быть полезна при подозрении на дискогенную боль, особенно при отсутствии грыжи диска. Этот метод позволяет оценить химический состав межпозвоночных дисков и выявить признаки дегенерации [50].
- 3D-DESS рекомендуется при диагностике сложных случаев грыж дисков, особенно фораминальных и экстрафораминальных, а также у пациентов с деформацией позвоночника. Этот метод обеспечивает высокую детализацию изображений и точность диагностики [51, 52].
- КТ-миелография может быть рекомендована при подозрении на стеноз позвоночного канала или сдавление нервных корешков, особенно в случаях, когда МРТ противопоказана или недоступна. Этот метод также может быть полезен для оценки костных структур позвоночника [53, 54, 55].

В целом выбор метода диагностики должен основываться на индивидуальных особенностях пациента, клинической картине и предполагаемом диагнозе. В некоторых случаях может потребоваться комбинированное применение нескольких методов для получения наиболее полной и точной информации.

II. АЛГОРИТМЫ ОБСЛЕДОВАНИЯ ПАЦИЕНТОВ С БОЛЯМИ В ПОЯСНИЦЕ.

Алгоритмы обследования пациентов с болями в пояснице с использованием описанных методов могут включать следующие этапы:

- Сбор анамнеза и физикальное обследование: проведение детального опроса пациента о характере боли, ее локализации, длительности,

факторах, усиливающих и облегчающих боль, а также неврологического осмотра для выявления возможных нарушений чувствительности или двигательной функции [17].

– Машинное обучение (МО): использование алгоритмов МО для анализа клинических данных пациента (например, возраст, пол, индекс массы тела, профессия, образ жизни) и результатов предыдущих обследований (например, рентгенография, МРТ) для оценки вероятности наличия болей в пояснице и прогнозирования их тяжести [22, 23, 24].

– Рентгенография: выполнение рентгенографии поясничного отдела позвоночника в двух проекциях (прямой и боковой) для выявления грубых дегенеративных изменений, переломов или других структурных аномалий [18].

– МРТ поясничного отдела позвоночника: проведение МРТ для более детальной визуализации мягких тканей, межпозвоночных дисков, нервных корешков и спинного мозга. В зависимости от клинической картины и результатов предыдущих обследований может быть использована стандартная МРТ, МР-нейрография, МР-спектроскопия или 3D-DESS [46, 47, 48, 49, 50, 51, 52].

- МР-нейрография: рекомендуется при подозрении на компрессию или повреждение нервных корешков (например, при радикулопатии) [46, 47, 48, 49].

- МР-спектроскопия: рекомендуется при подозрении на дискогенную боль, особенно при отсутствии грыжи диска [50].

- 3D-DESS: рекомендуется при диагностике сложных случаев грыж дисков (фораминальные и экстрафораминальные) или дегенеративных изменений позвоночника (спондилолиз) [51, 52].

– КТ-миелография: может быть рекомендована при подозрении на стеноз позвоночного канала или сдавление нервных корешков, особенно в случаях, когда МРТ противопоказана (например, при наличии металлических имплантатов) или недоступна [53, 54, 55].

– Дополнительные исследования: в некоторых случаях могут потребоваться дополнительные исследования, такие как электромиография (ЭМГ) для оценки функции нервов, лабораторные анализы для исключения воспалительных или инфекционных

заболеваний, а также консультации других специалистов (например, ревматолога, онколога) [18].

Этот алгоритм является общим и может быть модифицирован в зависимости от конкретной клинической ситуации и доступности методов диагностики. Важно отметить, что раннее и точное выявление причин болей в пояснице с использованием инновационных методов может существенно улучшить прогноз заболевания и качество жизни пациента.

III. ПЕРСПЕКТИВЫ КОМБИНИРОВАННОГО ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДОВ.

Интеграция данных различных методов может существенно повысить точность диагностики и эффективность лечения болей в поясничном отделе позвоночника. Например, машинное обучение может быть использовано для анализа данных МРТ, КТ и других методов, что позволит выявить скрытые закономерности и разработать более точные диагностические алгоритмы [59]. Комбинированное использование МР-нейрографии и МР-спектроскопии может дать более полное представление о состоянии нервных структур и межпозвоночных дисков, что поможет в дифференциальной диагностике и выборе оптимального лечения [46, 47, 48, 49, 50]. 3D-DESS и КТ-миелография, используемые совместно, могут обеспечить детальную визуализацию как мягких тканей, так и костных структур позвоночника, что особенно важно при диагностике сложных случаев [56].

Кроме того, комбинированное применение инновационных методов может способствовать разработке новых, более эффективных и персонализированных подходов к лечению болей в пояснице. Например, данные МРС, указывающие на наличие воспаления в межпозвоночном диске, могут быть использованы для выбора таргетной терапии, направленной на снижение воспаления [50]. Информация, полученная с помощью 3D-DESS и КТ-миелографии, может быть использована для планирования хирургического вмешательства с учетом индивидуальных особенностей анатомии пациента [51, 52, 53, 54, 55].

В целом комбинированное применение инновационных методов диагностики открывает новые горизонты в лечении болей в поясничном отделе позвоночника, позволяя проводить более точную диагностику, персонализированное лечение и прогнозирование результатов терапии.

Заключение. Инновационные методы диагностики болей в поясничном отделе позвоночника, такие как машинное обучение (МО) [34, 35, 36, 37], магнитно-резонансная нейрография (МРН) [46, 47, 48, 49], магнитно-резонансная спектроскопия (МРС) [50], 3D-DESS [51, 52, 56, 57, 58] и КТ-миелография [53, 54, 55],

представляют собой перспективные инструменты для повышения точности диагностики и эффективности лечения. Эти методы позволяют получить детальную информацию о состоянии нервных структур, межпозвоночных дисков и костных структур позвоночника, что способствует более точному выявлению причин боли и выбору оптимальной тактики лечения.

Для успешного внедрения инновационных методов в клиническую практику необходимо разработать стандартизированные протоколы и алгоритмы обследования пациентов с болями в пояснице [55]. Это позволит оптимизировать процесс диагностики, повысить ее точность и эффективность, а также снизить риск осложнений и побочных эффектов. Кроме того, важно проводить обучение медицинского персонала для правильного использования и интерпретации результатов новых методов диагностики.

Дальнейшие исследования должны быть направлены на выявление новых возможностей диагностики, разработку более эффективных и безопасных методов, а также оценку долгосрочных результатов их применения. Особое внимание следует уделить комбинированному использованию различных методов, что может значительно повысить точность диагностики и эффективность лечения [57]. Также необходимо продолжить исследования в области машинного обучения для создания более совершенных алгоритмов анализа данных и прогнозирования результатов лечения.

Список литературы / References:

1. Wu A., March L., Zheng X., Huang J., Wang X., Zhao J., ... & Hoy D. (2020). Global low back pain prevalence and years lived with disability from 1990 to 2017: estimates from the Global Burden of Disease Study 2017. *Annals of Translational Medicine*, 8(6).
2. Hoy D., Bain C., Williams G., March L., Brooks P., Blyth F., ... & Buchbinder R. (2012). A systematic review of the global prevalence of low back pain. *Arthritis and rheumatism*, 64(6), 2028-2037.
3. Maselli F., Storari L., Barbari V., Colombi A., Turolla A., Gianola S., ... & Testa M. (2020). Prevalence and incidence of low back pain among runners: a systematic review. *BMC musculoskeletal disorders*, 21(1), 1-21.
4. Gilchrist A., & Pokorn\u00e1, A. (2021). Prevalence of musculoskeletal low back pain among registered nurses: Results of an online survey. *Journal of Clinical Nursing*, 30(9-10), 1675-1683.
5. Lee H., Hubscher M., Moseley G.L., et al. (2015). How does pain lead to disability? A systematic review and meta-analysis of mediation studies in people with back and neck pain. *Pain*, 156(7), 988-997.
6. James S.L., Abate D., Abate K.H., et al. (2018). Global, regional, and national incidence, prevalence, and years lived with disability for 354 diseases and injuries for 195 countries and

- territories, 1990-2017: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2017. *Lancet*, 392(10159), 1789-1858.
7. Driscoll T., Jacklyn G., Orchard J., et al. (2014). The global burden of occupationally related low back pain: estimates from the Global Burden of Disease 2010 study. *Annals of the rheumatic diseases*, 73(6), 975-981.
 8. Hartvigsen J., Hancock M. J., Kongsted A., et al. (2018). What low back pain is and why we need to pay attention. *Lancet*, 391(10137), 2356-2367.
 9. Laštovková, A., Naklodalová, M., Fenclová, Z., Urban, P., Gafourek, P., Lebeda, T., ... & Pelclova, D. (2015). Low-back pain disorders as occupational diseases in the Czech Republic and 22 European countries: Comparison of national systems, related diagnoses and evaluation criteria. *Central European journal of public health*, 23(3), 244.
 10. Buchbinder R., van Tulder M., Öberg B., et al. (2018). Low back pain: a call for action. *Lancet*, 391(10137), 2384-2388.
 11. Hoy D., March L., Brooks P., et al. (2014). The global burden of low back pain: estimates from the Global Burden of Disease 2010 study. *Annals of the rheumatic diseases*, 73(6), 968-974.
 12. Erdem M.N., Erken H.Y., & Aydogan M. (2018). The effectiveness of non-surgical treatments, re-discectomy and minimally invasive transforaminal lumbar interbody fusion in post-discectomy pain syndrome. *Journal of Spine Surgery*, 4(3), 414-422.
 13. Donelson R., McIntosh G., & Hall H. (2012). Is it time to rethink the typical course of low back pain?. *PM&R*, 4(5), 394-401.
 14. Heuch I., Hagen K., & Zwart J.A. (2013). Body mass index as a risk factor for developing chronic low back pain: A follow-up in the Nord-Trøndelag Health Study. *Spine*, 38(1), 133-139.
 15. Hoskins W., Pollard H., Daff C., Odell A., Garbutt P., McHardy A., ... & Dragasevic G. (2009). Low back pain status in elite and semi-elite Australian football codes: A cross-sectional survey of football (soccer), Australian rules, rugby league, rugby union and non-athletic controls. *BMC musculoskeletal disorders*, 10(1), 1-11. 30
 16. Chen S., Chen M., Wu X., Lin S., Tao C., Cao H., ... & Xiao G. (2022). Global, regional and national burden of low back pain 1990–2019: a systematic analysis of the Global Burden of Disease study 2019. *Journal of orthopaedic translation*, 32, 49-58.
 17. Henderson J., Wilkinson K., Hofer T.P., Holleman R., Klamerus M.L., Bhatia R.S., & Kerr E.A. (2021). Agreement Among Measures Examining Low-Value Imaging for Low Back Pain. *American Journal of Managed Care*, 27(10).
 18. Balagué F., Mannion A.F., Pellisé F., & Cedraschi C. (2012). Non-specific low back pain. *The Lancet*, 379(9814), 482-491.
 19. Kamper S.J., Apeldoorn A.T., Chiarotto A., Smeets R.J., Ostelo R.W., Guzman J., & van Tulder M.W. (2015). Multidisciplinary biopsychosocial rehabilitation for chronic low back pain: Cochrane systematic review and meta-analysis. *BMJ*, 350, h444.
 20. Foster N.E., Anema J.R., Cherkin D., Chou R., Cohen S.P., Gross D.P., ... & Maher C.G. (2018). Prevention and treatment of low back pain: evidence, challenges, and promising directions. *The Lancet*, 391(10137), 2368-2383.
 21. Cao L. (2017). Data science: a comprehensive overview. *ACM Computing Surveys (CSUR)*, 50(3), 43.

22. Fatima M., Pasha M., et al. (2017). Survey of machine learning algorithms for disease diagnostic. *Journal of Intelligent Learning Systems and Applications*, 9(01), 1.
23. Nilashi M., Ibrahim O.B., Ahmadi H., & Shahmoradi L. (2017). An analytical method for diseases prediction using machine learning techniques. *Computers & Chemical Engineering*, 106, 212-23.
24. Gökhan S., & Nevin Y. (2019). Data analysis in health and big data: a machine learning medical diagnosis model based on patients' complaints. *Communications in Statistics-Theory and Methods*, 1-10.
25. Han J., Pei J., & Kamber M. (2011). *Data mining: concepts and techniques*. Amsterdam: Elsevier.
26. Kaelbling L.P., Littman M.L., & Moore A.W. (1996). Reinforcement learning: A survey. *Journal of artificial intelligence research*, 4, 237-285.
27. Pedregosa F., Varoquaux G., Gramfort A., Michel V., Thirion B., Grisel O., ... & Vanderplas J. (2011). Scikit-learn: Machine learning in Python. *the Journal of machine Learning research*, 12, 2825-2830.
28. Sarker I.H. (2021). Deep cybersecurity: a comprehensive overview from neural network and deep learning perspective. *SN Computer Science*, 2(3), 1-21.
29. Witten I.H., & Frank E. (2005). *Data Mining: Practical machine learning tools and techniques*. Morgan Kaufmann.
30. Dhall D., Kaur R., & Juneja M. (2020). Machine learning: a review of the algorithms and its applications. *Proceedings of ICRIC 2019: Recent innovations in computing*, 47-63.
31. Strieth-Kalthoff F., Sandfort F., Segler M. H., & Glorius F. (2020). Machine learning the ropes: principles, applications and directions in synthetic chemistry. *Chemical Society Reviews*, 49(17), 6154-6168.
32. Lo Piano S. (2020). Ethical principles in machine learning and artificial intelligence: cases from the field and possible ways forward. *Humanities and Social Sciences Communications*, 7(1), 1-7.
33. Kelleher J.D., Mac Namee B., & D'arcy A. (2020). *Fundamentals of machine learning for predictive data analytics: algorithms, worked examples, and case studies*. MIT press.
34. Kim T.; Kim Y.-G.; Park S.; Lee J.-K.; Lee C.-H.; Hyun S.-J.; Kim C.H.; Kim K.-J.; Chung C.K. Diagnostic Triage in Patients with Central Lumbar Spinal Stenosis Using a Deep Learning System of Radiographs. *J. Neurosurg. Spine* 2022, 37, 104–111.
35. D'Antoni F.; Russo F.; Ambrosio L.; Bacco L.; Vollero L.; Vadalà G.; Merone M.; Papalia R.; Denaro V. Artificial Intelligence and Computer Aided Diagnosis in Chronic Low Back Pain: A Systematic Review. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 2022, 19, 5971.
36. Staartjes V.E.; Quddusi A.; Klukowska A.M.; Schröder M.L. Initial classification of low back and leg pain based on objective functional testing: A pilot study of machine learning applied to diagnostics. *Eur. Spine J.* 2020, 29, 1702–1859.
37. Hu B.; Kim C.; Ning X.; Xu X. Using a deep learning network to recognise low back pain in static standing. *Ergonomics* 2018, 61, 1374–1381.
38. Ashouri S.; Abedi M.; Abdollahi M.; Manshadi F.D.; Parnianpour M.; Khalaf K. A novel approach to spinal 3D kinematic assessment using inertial sensors: Towards effective quantitative evaluation of low back pain in clinical settings. *Comput. Biol. Med.* 2017, 89, 144–149.
39. Sundarsingh S.; Kesavan R. Diagnosis of disc bulge and disc desiccation in lumbar MRI using concatenated shape and texture features with random forest classifier. *Int. J. Imaging Syst. Technol.* 2020, 30, 340–347.

40. Šušteršič T.; Milovanović V.; Ranković V.; Filipović N. A comparison of classifiers in biomedical signal processing as a decision support system in disc hernia diagnosis. *Comput. Biol. Med.* 2020, 125, 103978.
41. Sari M.; Gulbandilar E.; Cimbiz A. Prediction of low back pain with two expert systems. *J. Med. Syst.* 2012, 36, 1523–1527.
42. Jamaludin A., Kadir T., & Zisserman A. (2017). SpineNet: Automated classification and evidence visualization in spinal MRIs. *Medical Image Analysis*, 41, 63–73.
43. Oude Nijeweme-d'Hollosy W., et al. (2018). Evaluation of three machine learning models for self-referral decision support on low back pain in primary care. *International Journal of Medical Informatics*, 110, 31–41.
44. Tagliaferri S.D., et al. (2020). Artificial intelligence to improve back pain outcomes and lessons learnt from clinical classification approaches: three systematic reviews. *npj Digital Medicine*, 3(93). <https://doi.org/10.1038/s41746-020-0303-x>
45. D'Antoni F., Russo F., Ambrosio L., Bacco L., Vollero L., Vadalà G., Merone M., Papalia R., & Denaro V. (2022). Artificial Intelligence and Computer Aided Diagnosis in Chronic Low Back Pain: A Systematic Review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(10), 5971. <https://doi.org/10.3390/ijerph19105971>
46. Ku V., Cox C., Mikeska A., & MacKay B. (2021). Magnetic Resonance Neurography for Evaluation of Peripheral Nerves. *J Brachial Plex Peripher Nerve Inj*, 16, e17–e23.
47. Sollmann N., Weidlich D., Klupp E., Cervantes B., Ganter C., Zimmer C., Rummeny E.J., Baum T., Kirschke J.S., & Karampinos D.C. (2020). T2 mapping of the distal sciatic nerve in healthy subjects and patients suffering from lumbar disc herniation with nerve compression. *Magnetic Resonance Materials in Physics, Biology and Medicine*, 33(4), 713–724.
48. Manabe H., Sakai T., Miyagi R., Tezuka F., Yamashita K., Takata Y., & Sairyo K. (2019). Identification of abnormalities in the lumbar nerve tract using diffusion-weighted magnetic resonance neurography. *European Spine Journal*, 28(11), 2577–2583.
49. George V., Ismail M., Tilmans L., Ajam A., & Nguyen X. (2023). Review of Lumbosacral MR Neurography. *Contemporary Diagnostic Radiology*, 46(24), 1–8.
50. Gornet M.G., Peacock J., Claude J., Schranck F.W., Copay A.G., Eastlack R.K., Benz R., Olshen A., & Lotz J.C. (2019). Magnetic resonance spectroscopy (MRS) can identify painful lumbar discs and may facilitate improved clinical outcomes of lumbar surgeries for discogenic pain. *European Spine Journal*, 28(11), 2584–2593.
51. Liu W., Chen J., Zhang Y., Wang X., Zheng J., Huang A., ... & Li H. (2022). Diagnostic values of 2 different techniques for controversial lumbar disc herniation by conventional imaging examination: 3D-DESS vs. CT plain scan. *Frontiers in Physiology*, 13, 953423.
52. Kitakado A., Fukuda T., Kobayashi J., & Ojiri H. (2023). Diagnostic Utility of Double-Echo Steady-State (DESS) MRI for Fracture and Bone Marrow Edema Detection in Adolescent Lumbar Spondylolysis. *Diagnostics*, 13(3), 461.
53. Rocos B., Evans D.R.S., Rajayogeswaran B., & Hutchinson M.J. (2020). The normal appearance of CT myelograms. *European Spine Journal*, 29, 1087-1091.
54. Akbar K.K., Badikillaya V., Venkatesan M., Ramanan R.V., & Hedge S.K. (2021). Resurgence of the role of computed tomography myelogram in the era of MRI for surgical decision-making of lumbar degenerative disc disorder. *International Journal of Spine Surgery*, 15(4), 788-794.

55. Hutchins T.A., Peckham M., Shah L.M., Parsons M.S., Agarwal V., Boulter D.J., ... & Corey A. S. (2021). ACR appropriateness criteria low back pain: 2021 update. *Journal of the American College of Radiology*, 18(11), S361-S379.
56. Zheng J., Liu W., Zhu Q., Li G., Wu G., & Li H. (2023). Clinical classification of far lateral lumbar disc herniation under 3D-DESS imaging technology: guidance for PTED operation.
57. Liu W., Chen J., Zhang Y., Wang X., Zheng J., Huang A., ... & Li H. (2022). Diagnostic values of 2 different techniques for controversial lumbar disc herniation by conventional imaging examination: 3D-DESS vs. CT plain scan. *Frontiers in Physiology*, 13, 953423.
58. Kitakado A., Fukuda T., Kobayashi J., & Ojiri H. (2023). Diagnostic Utility of Double-Echo Steady-State (DESS) MRI for Fracture and Bone Marrow Edema Detection in Adolescent Lumbar Spondylolysis. *Diagnostics*, 13(3), 461.
59. Hardy P.A., Recht M.P., Piraino D., & Thomasson D. (1996). Optimization of a dual echo in the steady state (DESS) free-precession sequence for imaging cartilage. *Journal of Magnetic Resonance Imaging*, 6(2), 329-335.

Поступила/Received: 01.07.2024
Принята в печать/Accepted: 17.09.2024