

<https://doi.org/10.52420/usmumb.10.1.e00133>

<https://elibrary.ru/YKCESE>

Обзор

Применение текстурного анализа в МР-диагностике патологий плечевого сустава: литературный обзор

Наталья Сергеевна Шабарова✉, Александр Андреевич Жилияков,
Андрей Викторович Жилияков, Елена Александровна Волокитина

Уральский государственный медицинский университет, Екатеринбург, Россия

✉ tashabarova1@yandex.ru

Аннотация. Патологии плечевого сустава, особенно повреждения мягких тканей, представляют собой распространенную проблему, требующую точной и своевременной диагностики. В настоящее время «золотым стандартом» в визуализации повреждений плечевого сустава является МРТ. Однако интерпретация этого метода зачастую субъективна и зависит от опыта специалиста. Решением проблемы может стать текстурный анализ (ТА), основанный на количественной оценке МР-изображений, что позволяет дополнить и уточнить экспертную оценку. В обзоре рассматриваются современные исследования, посвященные применению ТА в диагностике патологий плечевого сустава. Анализируются различные методы ТА, а также их применение для оценки структур плечевого сустава, сравнивается эффективность автоматизированных подходов, основанных на машинном обучении, с экспертной интерпретацией МР-изображений, а также обсуждаются преимущества и ограничения анализа. Внедрение искусственного интеллекта, в частности методов ТА изображений, в клиническую практику является прогрессивным шагом в развитии медицинской диагностики. Это позволит подкреплять доводы врачей объективной оценкой, полученной на основании математических алгоритмов машинного обучения, что повысит не только диагностическую точность, но и поможет разработать более точную тактику лечения и профилактики различных патологий.

Ключевые слова: плечевой сустав • магнитно-резонансная томография • глубокое обучение • травмы плеча • радиомика • искусственный интеллект

Для цитирования: Шабарова НС, Жилияков АА, Жилияков АВ, Волокитина ЕА. Применение текстурного анализа в диагностике патологий плечевого сустава: литературный обзор. *Вестник УГМУ*. 2025;10(1):e00133. DOI: <https://doi.org/10.52420/usmumb.10.1.e00133>. EDN: <https://elibrary.ru/YKCESE>.

© Шабарова Н. С., Жилияков А. А., Жилияков А. В., Волокитина Е. А., 2025

© Shabarova N. S., Zhilyakov A. A., Zhilyakov A. V., Volokitina E. A., 2025

Review

Application of Texture Analysis in the MR-Diagnosis of Shoulder Pathologies: A Literature Review

Natalia S. Shabarova✉, Alexander A. Zhilyakov,
Andrey V. Zhilyakov, Elena A. Volokitina

Ural State Medical University, Ekaterinburg, Russia

✉ tashabarova1@yandex.ru

Abstract. Shoulder pathologies, particularly soft tissue injuries, are a common problem requiring accurate and timely diagnosis. Currently, MRI is the gold standard for visualizing shoulder injuries. However, the interpretation of MRI often relies on the subjective assessment of the examiner and can vary depending on their experience. Texture analysis (TA), based on the quantitative evaluation of MRI images, offers a solution by providing objective data that complements and refines expert evaluation. This review examines current research on the application of TA in diagnosing shoulder pathologies. We analyze various TA methods and their application for evaluating different shoulder structures. We compare the performance of automated, machine learning-based approaches with expert interpretation of MRI images. The advantages and limitations of TA are also discussed. The integration of artificial intelligence, and specifically image texture analysis, into clinical practice represents a significant advancement in medical diagnostics. This approach promises substantial benefits by augmenting physicians' expertise with objective assessments derived from mathematical algorithms and machine learning. This integration is expected to not only enhance diagnostic accuracy but also contribute to the development of more precise treatment strategies and preventative measures for various pathologies.

Keywords: shoulder joint • magnetic resonance imaging • deep learning • shoulder injuries • radiomics • artificial intelligence

For citation: Shabarova NS, Zhilyakov AA, Zhilyakov AV, Volokitina EA. Application of texture analysis in the diagnosis of shoulder pathologies: A literature review. *USMU Medical Bulletin*. 2025;10(1):e00133. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.52420/usmumb.10.1.e00133>. EDN: <https://elibrary.ru/YKCESE>.

Актуальность и развитие технологий визуализации в диагностике патологий плечевого сустава

Диагностика заболеваний плечевого сустава претерпела изменения благодаря стремительному развитию технологий визуализации. Медицина прошла путь от простых методов, таких как рентгенография и ультразвуковое исследование (УЗИ), к сложным и высокотехнологичным: магнитно-резонансной томографии (МРТ) и компьютерной томографии (КТ).

нансной (МРТ) и компьютерной томографии (КТ). Каждый из них обладает уникальным набором преимуществ и ограничений, что и определяет его роль в диагностическом процессе [1, 2].

Рентгенография до сих пор остается основным методом первичной оценки костных структур плечевого сустава, позволяя выявлять переломы, вывихи и дегенеративно-дистрофические модификации [3, 4]. Цифровая рентгенограмма формирует изображение высокой четкости за счет использования пикселей, передающих градации серого, причем такие снимки не только подлежат сохранению, но и могут обрабатываться как электронный источник данных. Указанный подход позволяет увеличивать изображение без потери качества, что делает его оптимальным для извлечения радиологических параметров даже небольших областей снимка. Однако возможности рентгенографии в визуализации мягких тканей, таких как вращательная манжета плеча, связки и хрящ, ограничены [5].

УЗИ, будучи недорогим и доступным методом исследования относительно вышеперечисленных, позволяет в режиме реального времени проводить функциональную оценку мягких тканей плечевого сустава, включая визуализацию сухожилий вращательной манжеты, связок и суставной капсулы [5, 6]. Формируемое изображение создается из характерных паттернов серых пикселей, что позволяет получать важную диагностическую информацию о состоянии структур, а также извлекать текстурные данные для дальнейшего анализа и количественной оценки особенностей тканей [7]. Однако точность УЗИ во многом зависит от опыта специалиста, а его применение ограничено при визуализации глубоко расположенных структур. Например, в исследовании М. Дея и др. (*англ.* M. Day et al.; 2016) сообщается, что точность первичной диагностики у хирурга после обучения составляет 51 %, тогда как к концу профессиональной карьеры этот показатель увеличивается до 69 % [8].

КТ активно используется для изучения костных структур плечевого сустава, особенно в случаях сложных переломов и травм этой области [9]. Формирование изображений основано на преобразовании данных в пиксели, которые отражают плотность тканей через их радиологические характеристики, измеряемые в единицах Хаунсфилда. Такой принцип построения позволяет не только визуализировать мелкие детали суставных поверхностей или смещения костных отломков, но и проводить количественный анализ плотности костной ткани [10]. Однако КТ имеет ограниченные возможности при изучении мягкотканых структур плечевого сустава, таких как связки, вращательная манжета и хрящевые элементы, что требует использования дополнительных методов, например МРТ.

МРТ считается «золотым стандартом» визуализации плечевого сустава благодаря превосходному контрасту мягкотканых структур и высокой детализации анатомических элементов [5, 11]. Формируемое изображение создается из характерного для тканей набора серых пикселей, что обеспечивает

возможность высококачественного отображения даже мелких деталей, необходимых для диагностики. Высокопольная МРТ позволяет получать изображения высокого разрешения и отличается улучшенной визуализацией незначительных патологических изменений [12]. Тем не менее высокая стоимость и наличие противопоказаний, таких как металлические имплантаты в теле пациента, ограничивают доступность этого метода [6]. Более того, существуют исследования, указывающие на ограничения в диагностической точности. Например, в работе М. Брокмейера и др. (нем. М. Brockmeyer et al.; 2017) проведен сравнительный анализ результатов МРТ с интраоперационной артроскопией при диагностике неполных разрывов вращательной манжеты, где чувствительность и специфичность МРТ составили 51,6 % и 77,2 % соответственно [13].

Развитие инструментальных методов исследований расширило диагностические возможности, однако главная проблема любого из вышеперечисленных — это субъективная интерпретация изображений. Одним из вариантов решения этой проблемы может стать текстурный анализ (ТА); дополняя традиционные методы диагностики, он способен предоставлять объективные количественные данные о гетерогенности тканей, тем самым повышая диагностическую точность [14].

МРТ является одной из наиболее продвинутых технологий визуализации, особенно в отношении мягких тканей, что делает ее наиболее подходящей основой для применения ТА [15]. Благодаря способности формировать изображения высокого качества с детальной визуализацией структур мягких тканей МРТ позволяет извлекать текстурные характеристики, которые могут углубить понимание патологических изменений в плечевом суставе [16]. Несмотря на существующие ограничения, такие как высокая стоимость и наличие противопоказаний, именно этот метод обеспечивает наивысшее пространственное разрешение, необходимое для объективного анализа сложных анатомических структур.

Плечевой сустав до настоящего времени остается недостаточно изученной областью в контексте применения ТА МР-изображений [17], что подчеркивает актуальность настоящего обзора. Целью работы является оценка потенциала использования МРТ для ТА тканей плечевого сустава. Основной акцент сделан на возможности применения количественных характеристик, извлеченных из МР-данных, для более точного и объективного изучения состояния суставных структур. Такой подход создает предпосылки для совершенствования диагностики, повышения достоверности оценки патологий и разработки персонализированных лечебных стратегий.

Методология поиска литературы

Для поиска использовались такие библиографические базы данных, как PubMed, Semantic Scholar и SpringerOpen. Поскольку ТА является новым спо-

собом интерпретации изображений и в ортопедической семантике не распространен, то главной задачей стал подбор вероятных синонимов к ключевому слову “texture analysis”. Также точность поиска повышалась с помощью терминов MeSH*, которые найдены исходя из ключевых слов. В итоге поисковые запросы представляли собой комбинации ключевых слов с терминами MeSH, например («shoulder joint» [MeSH] AND «magnetic resonance imaging» [MeSH]) AND («texture analysis» OR radiomics).

Для включения в обзор исследования должны были соответствовать следующим критериям:

- 1) оригинальны и опубликованы в рецензируемых журналах;
- 2) посвящены применению ТА к МР-изображениям плечевого сустава, а также различным технологиям ТА;
- 3) включают в себя количественные данные о диагностической точности или прогностической ценности ТА;
- 4) опубликованы на русском и английском языках.

Во время отбора исключены публикации, которые не содержат достаточной информации для оценки качества исследования или извлечения данных; посвящены другим методам анализа изображений, отличным от ТА.

Результаты

В ходе поиска по базам данных найдено 207 публикаций; после проверки по вышеперечисленным критериям отобрано 48 статей; после прочтения полных текстов — 37 работ. Таким образом, в обзор вошли 1 статья 2006 г., 5 статей 2010–2019 гг. и 31 статья 2020–2024 гг.

Анализ найденных публикаций показал, что технологии ТА активно развиваются и находят применение в исследованиях анатомических структур благодаря своей высокой информативности и способности описывать количественные параметры тканей.

Для структурирования обзора и изложения материала с учетом специфики темы выделена следующая логическая последовательность разделов:

- 1) технологии ТА в медицинской визуализации — рассматриваются ключевые принципы и алгоритмы метода;
- 2) особенности оценки изменений тканей плечевого сустава с использованием ТА — определение диагностических критериев на основе количественных параметров;
- 3) диагностическая точность и специфичность ТА при оценке патологий плечевого сустава — оценка эффективности технологии в выявлении гетерогенности и патологических изменений тканей;
- 4) клиническая значимость ТА в лечении патологий плечевого сустава — использование метода для стратификации тяжести и прогнозирования исходов заболеваний;

* MeSH — медицинские предметные рубрики (англ. Medical Subject Headings).

- 5) сравнение экспертной интерпретации и автоматизированных подходов в диагностике патологий плечевого сустава — преимущества сочетания алгоритмов ТА с традиционной клинической оценкой.

Технологии текстурного анализа в медицинской визуализации

ТА — мощный инструмент количественной оценки медицинских изображений, основанный на извлечении математических характеристик, описывающих пространственное расположение и распределение интенсивности цвета пикселей с градиентом от белого до черного.

Существует множество алгоритмов ТА, каждый из которых фокусируется на определенных аспектах тканевой структуры. Одним из наиболее распространенных методов является анализ на основе матрицы совместной встречаемости уровней серого Харалика (*англ.* Gray-Level Co-occurrence Matrix, GLCM). GLCM описывает частоту встречаемости различных комбинаций уровней серого в изображении на заданном расстоянии и в определенном направлении. Для этого создается матрица, размер которой определяется количеством градаций серого в изображении. Алгоритм последовательно рассматривает каждый пиксель и его соседей (обычно сверху, снизу, слева и справа) на определенном расстоянии, подсчитывая, сколько раз встречается каждая пара уровней серого.

Для представления результатов работы алгоритмов созданы специальные программы, с помощью которых матрица выводится на экран компьютера не в виде числовых значений, а изображения. З. Хатун и др. (*англ.* Z. Khatun et al.; 2024) используют GLCM для анализа пространственных отношений между интенсивностями пикселей, извлекая такие характеристики, как контраст, корреляция, энергия и гомогенность [14].

Фрактальный анализ — другой подход к ТА. Он оценивает сложность и самоподобие структур, анализируя, насколько повторяются одни и те же узоры на разных масштабах. Высокая фрактальная размерность указывает на более сложную, извилистую структуру, что может быть признаком патологических изменений. Несмотря на отсутствие прямых примеров использования фрактального анализа в работах, посвященных плечевому суставу, его потенциал в выявлении ранних признаков патологических процессов, невидимых при традиционных методах, подтверждается исследованиями в других областях.

Анализ гистограмм, основанный на распределении интенсивности пикселей в изображении, — более простой метод ТА, который объективизирует частоту встречаемости каждого уровня серого в интересующей области. Из полученной гистограммы можно извлечь статистические параметры, такие как среднее значение, стандартное отклонение, асимметрия и эксцесс, характеризующие яркостные свойства тканей. К примеру, З. Хатун и др. [14] используют анализ гистограмм как часть своего подхода к извлечению признаков для сегментации изображения.

Сочетание различных методов ТА позволяет получить комплексную картину микроструктурных изменений в тканях и повысить точность диагностики. В связи с этим применение врачами-исследователями статистических методов, таких как корреляционный и сравнительный анализы, позволяет выявить взаимосвязи между текстурными характеристиками и клиническими параметрами, включая стадию заболевания, интенсивность боли и функциональные ограничения, а также дифференцировать здоровые и пораженные ткани [18, 19].

В свою очередь, алгоритмы машинного обучения, с помощью которых извлекается большое количество радиомических показателей, позволяют автоматизировать классификацию патологий (например, различение частичных и полных разрывов вращательной манжеты), прогнозировать течение заболевания и эффективность лечения, а также кластеризовать пациентов со схожими текстурными профилями для выявления подтипов заболеваний [11, 14, 17]. Дополнительные аналитические инструменты, такие как визуализация данных и анализ временных рядов, способствуют интерпретации сложных текстурных данных и отслеживанию динамики изменений в тканях.

Корректная систематизация и оценка полученных данных позволяет выявить патологии на ранних стадиях, улучшить дифференциальную диагностику, прогнозировать исходы и персонализировать лечение, объективно оценивая эффективность терапевтических подходов и способствуя более глубокому пониманию патогенеза заболеваний плечевого сустава.

Особенности оценки изменений тканей плечевого сустава с использованием текстурного анализа

ТА выходит за рамки простой идентификации разрывов вращательной манжеты и демонстрирует потенциал в диагностике широкого спектра патологий плечевого сустава. Благодаря четкой визуализации на МР-снимках с помощью ТА можно одновременно изучить как мягкотканые структуры (мышцы, сухожилия, связки, хрящи), так и костные. Комплексная визуализация позволяет получить полную картину состояния плечевого сустава и выявить взаимосвязь между различными типами тканей. Чж. Тянь и др. (*англ.* Zh. Tian et al.) используют количественные параметры МР-изображений, что позволяет оценивать различные тканевые характеристики, включая и характеристики костной ткани [20]. Эта способность МРТ одновременно оценивать различные типы тканей делает ее незаменимым инструментом для диагностики сложных случаев, когда патологические изменения могут затронуть множество структур плечевого сустава.

Диагностика повреждений сухожилий часто затруднена. ТА способен выявить тонкие изменения в структуре сухожильной ткани, которые могут предшествовать развитию полных разрывов и не всегда видны при обычной МРТ. Например, при оценке подлопаточного сухожилия ТА позволя-

ет выявить незначительные изменения в структуре ткани, которые могут предшествовать развитию полноценных разрывов, что особенно важно, т. к. повреждения подлопаточного сухожилия зачастую сложно диагностировать с помощью стандартных методов визуализации. Т. Р. Ан и др. (англ. T. R. Ahn et al.; 2022) отмечают, что обычная МРТ имеет ограниченную точность, в среднем 82,5 % и 78,5 % при обнаружении разрывов ПА и ПВ стадий или выше соответственно, при применении классификации Дж. Ч. Ю и Ю. Г. Ри (англ. J. Ch. Yoo and Y. G. Rhee) для диагностики разрывов подлопаточной мышцы [21]. В этом контексте ТА может повысить точность ранней диагностики тендинопатии и прогнозирования будущих разрывов.

В диагностике повреждений мышечных структур ТА также демонстрирует многообещающие результаты. Например, М. Ни и др. (англ. M. Ni et al.; 2023) показали, что при повреждении надостной мышцы их автоматизированная многофункциональная DL-система* может помочь в распознавании таких повреждений на МР-изображениях и дать точную оценку степени повреждения [22]. Это позволяет точнее диагностировать такой тип повреждений и, возможно, избежать ненужных хирургических вмешательств.

Кроме того, ТА может быть использован для количественной оценки дегенеративных изменений в хрящевой ткани и суставной губе. Чж. Тянь и др. (2024) описывают, как изменения интенсивности сигнала на T2-взвешенных и псевдоцветных изображениях коррелируют со степенью повреждения вращательной манжеты, включая дегенеративные изменения [20]. Повреждения суставной губы, например SLAP-повреждения**, как показано в исследовании М. Ни и др. (2023), также могут быть прекрасно визуализированы с помощью DL-систем, использующих ТА в качестве основы. Авторы разработали нейросеть SLAP-Net, результаты применения которой превосходили опытных рентгенологов и имели точность 85–90 % [23].

МРТ может служить косвенным маркером дегенеративных изменений в связанных структурах. Например, Чж. Тянь и др. [20] оценивают жировую инфильтрацию (англ. Fat Fraction) в параартикулярных мышцах, которая может быть связана с дегенеративными процессами в суставе. Особенно ценным показателем жировой инфильтрации мышц становится в динамике. При его регулярном сравнении на протяжении определенного периода можно сделать вывод о прогрессе или регрессе заболевания, что, в свою очередь, может быть полезно для оценки эффективности консервативного лечения и принятия решения о хирургическом вмешательстве.

Хотя рентгенография остается основным методом визуализации костных структур плечевого сустава, ТА способен предоставить дополнительную информацию о микроструктуре костной ткани, что может быть полезно, например при оценке плотности кости или выявлении ранних признаков остеопо-

* DL — глубокое обучение (англ. Deep Learning).

** SLAP — передне-задняя верхняя губа (англ. Superior Labrum Anterior and Posterior).

роза. Тем не менее ограничением рентгенографии является невозможность детальной оценки изменений глубоких тканей из-за суммационного эффекта наложения анатомических структур друг на друга, что создает определенные трудности при диагностике патологических состояний. В своем исследовании Г. Ван и Я. Хань (*англ.* G. Wang and Y. Han) указывают на существующие сложности при анализе МР-изображений, где точность сегментации костных структур снижается из-за частичного объемного эффекта и схожести МР-сигнала различных тканей. Для преодоления этих ограничений исследователями разработана DL-система AlexNet для оценки костей плечевого сустава, демонстрирующая высокую точность (около 95%) [24].

Диагностическая точность и специфичность текстового анализа при оценке патологий плечевого сустава

Количество работ, посвященных оценке диагностических возможностей ТА в визуализации патологий плечевого сустава, можно охарактеризовать как недостаточное. При этом большинство из них акцентировано на узкой проблеме: изучении только одной нозологии или оценке изменений единственной анатомической структуры плечевого сустава. Например, Ш. Акияма и др. (*Sh. Akiyama et al.*) продемонстрировали количественную оценку жировой дегенерации мышц вращательной манжеты плеча с помощью МР-изображений [12]. Такой подход особенно важен в диагностике ранних стадий дегенеративных заболеваний, например, тендинопатии, где структурные изменения могут быть минимальными, но при этом сопровождаться изменениями в организации тканей на микроскопическом уровне.

Также в исследованиях продемонстрировано, что текстурные характеристики, извлеченные из МР-изображений, позволяют различать нормальные и патологические ткани вращательной манжеты с высокой точностью. Например, в исследовании М. Ни и др. представлено, что DL-система на основе МР-изображений показала хорошие результаты (площадь под кривой составила 0,98 и 0,97 в наборах данных внутри группы и вне ее соответственно) в диагностике повреждений сухожилия надостной мышцы [25], что подтверждает высокую чувствительность и специфичность ТА в диагностике разрывов вращательной манжеты. Параметры, полученные из GLCM, такие как контраст, корреляция, энергия и гомогенность, указывают на нарушение однородности ткани, характерное для тендинопатии и частичных разрывов [14].

Использование высокопольной МРТ в сочетании с ТА позволяет выявить еще более тонкие изменения в сухожилиях вращательной манжеты, повышая точность диагностики частичных разрывов. В исследовании Я. Алика и др. (*англ.* Y. Alike et al.) использовались МРТ-сканеры с напряженностью магнитного поля 1,5 и 3,0 Тл, что обеспечивает более высокое пространственное разрешение и позволяет точнее оценить микроструктуру тканей, а также извлечь более информативные текстурные характеристики [11].

Одним из ключевых преимуществ ТА является его способность дифференцировать тендинопатию и частичные разрывы, которые зачастую сложно различить при визуальной оценке стандартных МР-изображений. Как отмечают К. Р. Адамс и др. (*англ.* C. R. Adams et al.), диагностика разрывов подлопаточной мышцы остается сложной задачей, ТА может сыграть важную роль в ее улучшении [26], что позволит точнее определить степень повреждения сухожилия и выбрать наиболее эффективную стратегию лечения.

Клиническая значимость текстурного анализа в лечении патологий плечевого сустава

Традиционно выбор между консервативным и хирургическим лечением разрывов вращательной манжеты плеча основывался на сочетании клинического осмотра, визуальной оценки изображений и опыта врача. Как отмечено в работе Ч. С. Говды и др. (*англ.* Ch. S. Gowda et al.; 2024), клиническое обследование больного позволяет сузить круг вариантов патологии, но не обеспечивает диагностической точности [6]. Решение оперировать часто основывается на субъективной оценке, что может быть затруднительным, особенно при наличии сопутствующих повреждений [8].

В таких спорных случаях ТА способен повысить объективность при принятии решения о хирургическом вмешательстве. М. Брокмейер и др. (2017) также подчеркивают необходимость более точной дифференциации для выбора оптимальной стратегии лечения [13]. Например, при разрывах вращательной манжеты плеча ТА может помочь дифференцировать частичные разрывы, которые хорошо поддаются консервативному лечению, от полных, требующих хирургического вмешательства. Возможность более точной оценки состояния сухожилия с помощью ТА, как указано в исследовании Я. Алика и др. (2023), позволяет избежать ненужных операций и связанных с ними рисков, а также оптимизировать выбор консервативной терапии [11].

Более того, текстурные характеристики, извлеченные из предоперационных МР-изображений, могут быть использованы для прогнозирования исходов лечения и оценки риска осложнений. Например, корреляция определенных текстурных параметров с риском повторного разрыва вращательной манжеты плеча после хирургического восстановления, как показано в работе Т. Р. Ан и др. (2022), позволяет врачам точнее оценивать прогноз и разрабатывать персонализированные планы реабилитации [21], что повышает эффективность и безопасность лечения, предоставляя пациентам стратификацию риска, специфичную для каждого случая [27].

ТА также играет важную роль в прогнозировании исходов хирургического лечения. Предоперационная оценка текстурных характеристик тканей может помочь предсказать вероятность успешного восстановления после операции или повторного разрыва после шва вращательной манжеты [28]. Например, в исследованиях показано, что повышенная энтропия и низкая однородность

тканей вращательной манжеты перед операцией может быть связана с более высоким риском рецидива разрыва после хирургического вмешательства [29, 30]. Подобная информация позволяет хирургам адаптировать хирургическую технику, выбрать оптимальный тип имплантата и разработать индивидуальный план реабилитации или дополнительные консервативные методы [28, 31, 32]. В то же время пациенты с низким риском могут избежать излишне агрессивного лечения и сократить длительность реабилитации [33].

Сравнение экспертной интерпретации и автоматизированных подходов в диагностике патологий плечевого сустава

Стремительное развитие машинного обучения и искусственного интеллекта открывает беспрецедентные возможности для автоматизации анализа медицинских изображений, включая МРТ плечевого сустава. Системы, основанные на DL и других алгоритмах, обучаются на обширных наборах данных, содержащих тысячи изображений с различными патологиями. Для обучения надежных моделей машинного обучения, предназначенных для одновременного анализа большого количества медицинских изображений, требуются крупные аннотированные наборы данных. С.Х. Ким и др. (англ. S. H. Kim et al.; 2024) утверждают, что это позволит моделям автоматически извлекать релевантные текстурные характеристики и с высокой точностью классифицировать различные патологии, существенно облегчая работу исследователей [34]. Автоматизация извлечения признаков позволяет выявлять сложные текстурные характеристики, которые могут быть неочевидны для человеческого глаза [14].

В предварительных исследованиях продемонстрированы впечатляющие результаты, позволяющие сделать вывод, что автоматизированные системы на основе машинного обучения могут достигать диагностической точности, сравнимой с экспертной оценкой опытных радиологов [30]. Например, Д. Го и др. (D. Guo et al.; 2023) показали, что их 2D-CNN-модель* достигла уровня показателей работы для младших рентгенологов и хирургов-ортопедов в диагностике разрывов надостной мышцы [35]. Более того, в некоторых случаях алгоритмы машинного обучения превосходят человека в выявлении незначительных изменений и классификации сложных случаев.

Автоматизация анализа изображений с помощью машинного обучения имеет потенциал решить несколько важных проблем в радиологии. Во-первых, она способна уменьшить время, требуемое для анализа снимков, что даст возможность врачам быстрее диагностировать заболевания и приступать к их лечению [35]. Во-вторых, машинное обучение может снизить субъективность и вариабельность интерпретации изображений, обеспечивая более стандартизированный и объективный подход к диагностике. Т. Р. Ан

* CNN — сверточная нейронная сеть (англ. Convolutional Neural Network).

и др. (2022) продемонстрировали превосходное соответствие между наблюдателями при использовании их модели для оценки разрывов подлопаточной мышцы [21]. В-третьих, автоматизированные системы могут быть особенно полезны в регионах с малым количеством квалифицированных радиологов, повышая качество и доступность медицинской помощи.

Обсуждение

Преимущества и ограничения текстурного анализа в оценке патологий плечевого сустава

Несмотря на многообещающие результаты и растущую популярность, ТА в медицинской визуализации сталкивается с рядом ограничений, которые необходимо учитывать при его применении в клинической практике. Одним из ключевых вызовов является сложность стандартизации методики и интерпретации результатов. Разнообразии алгоритмов ТА в сочетании с вариабельностью параметров сканирования МРТ (например, напряженность магнитного поля, последовательности импульсов) может влиять на получаемые текстурные характеристики.

Как отмечают Цз. Хэ и др. (*англ.* Z. He et al.; 2024), даже при использовании одного и того же типа МРТ-сканера (1,5 или 3,0 Тл) результаты обработки изображений могут различаться, что затрудняет сопоставление различных исследований и ограничивает их применимость для метаанализа [17]. Отсутствие единых стандартизированных протоколов для проведения ТА также является препятствием для его широкого внедрения в клиническую практику.

В работах Ё. Шим и др. (*англ.* E. Shim et al.), а также многих других авторов, использующих 3D-модели изображений, можно заметить, что их раскadroвка и анализ требовательны к параметрам вычислительных устройств и качеству обучения DL-моделей [36], что может быть проблематичным для клиник с ограниченным бюджетом и отсутствием мощного вычислительного оборудования [17]. Необходимость в дополнительном обучении персонала также может сдерживать внедрение ТА в рутинную клиническую практику.

Наконец, важно помнить, что ТА является дополнительным инструментом к стандартной визуальной оценке изображений, но не заменяет ее полностью. Как и в случае с любым диагностическим инструментом, клиническая картина, опыт врача и результаты других исследований должны быть учтены при принятии окончательного решения [8].

Перспективы и будущие направления

Будущее ТА в медицинской визуализации представляется перспективным; метод открывает широкие возможности для улучшения диагностики, прогнозирования и персонализации лечения заболеваний опорно-двигательного аппарата [37]. Одним из ключевых направлений развития анализа изображений является совершенствование алгоритмов машинного обу-

чения, включая DL и различные типы нейронных сетей. Разработка более сложных и точных моделей позволит автоматизировать процесс обучения, повысит скорость обработки огромного количества данных и точность диагностики.

Дальнейшее развитие ТА связано с интеграцией текстурных характеристик с другими клиническими данными в DL-системы. Объединение информации, полученной из изображений, с данными о возрасте, поле, уровне физической активности, генетической предрасположенности, анамнезе заболевания и результатах лабораторных исследований позволит создать более полную картину состояния пациента и увеличит прогностическую способность для определения исходов лечения. Я. Алик и др. (2023) продемонстрировали успешную интеграцию клинических данных и данных визуализации для построения прогностической модели [11].

Чж. Тянь и др. (2024) использовали количественную МРТ для оценки повреждений вращательной манжеты плеча, что демонстрирует потенциал ТА для оценки качества хряща, плотности костной ткани и других свойств тканей в различных суставах [20]. В перспективе ТА может стать неотъемлемой частью клинической практики в ортопедии и травматологии, обеспечивая более точную, объективную и персонализированную медицинскую помощь.

Одним из ключевых препятствий на пути эффективного применения ТА является необходимость аннотирования огромного количества изображений для обучения алгоритмов машинного обучения. Эта трудоемкая задача требует участия высококвалифицированных специалистов и временных затрат. Кроме того, полученные с помощью ТА количественные данные не всегда легко интегрировать с клинической информацией, которая часто представлена в описательной форме. Для решения этой проблемы необходима разработка надежных классификаторов или шкал, которые позволят переводить описательные дефиниции в количественные показатели. Перевод качественных характеристик в количественные значения позволит использовать их как входные данные для моделей машинного обучения и улучшить интеграцию ТА с клиническими данными. Разработка и валидация таких инструментов — важное направление будущих исследований в области применения ТА в медицинской визуализации.

Заключение

ТА выходит за рамки субъективной визуальной оценки МРТ, предоставляя количественные характеристики тканей на микроскопическом уровне, что важно для ранней диагностики и дифференциации схожих заболеваний (например, тендинопатии и частичных разрывов вращательной манжеты). Применение ТА как часть искусственного интеллекта имеет огромный потенциал для автоматизации диагностической работы, а при интеграции с клиническими данными — персонализации лечения.

Список источников • References

1. Iio R, Ueda D, Matsumoto T, Manaka T, Nakazawa K, Ito Y, et al. Deep learning-based screening tool for rotator cuff tears on shoulder radiography *Journal of Orthopaedic Science*. 2024;29(3):828–834. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jos.2023.05.004>.
2. Rodriguez HC, Rust B, Hansen PY, Maffulli N, Gupta M, Potty AG, et al. Artificial intelligence and machine learning in rotator cuff tears. *Sports Medicine and Arthroscopy Review*. 2023;31(3):67–72. DOI: <https://doi.org/10.1097/JSA.0000000000000371>.
3. Логвинов АН, Ильин ДО, Каданцев ПМ, Макарьева ОВ, Бурцев МЕ, Рязанцев МС, и др. Рентгенологические характеристики акромиального отростка лопатки как прогностический фактор формирования неполнослойных разрывов вращательной манжеты. *Гений ортопедии*. 2019;25(1):71–78. DOI: <https://doi.org/10.18019/1028-4427-2019-25-1-71-78>.
4. Bredella MA, Steinbach LS, Morgan S, Ward M, Davis JC. MRI of the sacroiliac joints in patients with moderate to severe ankylosing spondylitis. *American Journal of Roentgenology*. 2006;187(6):1420–1426. DOI: <https://doi.org/10.2214/AJR.05.1423>.
5. Ganesh J, Patil SD, Muchchandi R, Naik S. Diagnostic comparison of ultrasound and magnetic resonance imaging in detecting rotator cuff tears: A study conducted in the population of vijayapura. *Cureus*. 2024;16(8):e68302. DOI: <https://doi.org/10.7759/cureus.68302>.
6. Gowda CS, Mirza K, Galagali DA. Rotator cuff tears: Correlation between clinical examination, magnetic resonance imaging and arthroscopy. *Cureus*. 2024;16(3):e56065. DOI: <https://doi.org/10.7759/cureus.56065>.
7. Triantafyllou M, Vassalou E, Goulianou A, Tosounidis T, Marias K, Karantanas A, et al. The effect of ultrasound image pre-processing on radiomics feature quality: A study on shoulder ultrasound. *Journal of Imaging Informatics in Medicine*. 2025. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10278-025-01421-w>.
8. Day M, Phil M, McCormack RA, Nayyar S, Jazrawi L. Physician training ultrasound and accuracy of diagnosis in rotator cuff tears. *Bulletin of the Hospital for Joint Disease*. 2016;74(3):207–211. PMID: <https://pubmed.gov/27620544>.
9. Feuerriegel G, Kronthaler S, Weiss K, Haller B, Leonhardt Y, Neumann J, et al. Assessment of glenoid bone loss and other osseous shoulder pathologies comparing MR-based CT-like images with conventional CT. *European Radiology*. 2023;33(12):8617–8626. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00330-023-09939-9>.
10. Cui DD, Long Y, Yan Y, Li C, Yang YT, Zhong JL, et al. Three-dimensional magnetic resonance imaging fast field echo resembling a computed tomography using restricted echo-spacing sequence is equivalent to 3-dimensional computed tomography in quantifying bone loss and measuring shoulder

- morphology in patients with shoulder dislocation. *Arthroscopy: The Journal of Arthroscopic & Related Surgery*. 2024;40(6):1777–1788. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.arthro.2023.12.016>.
11. Alike Y, Li C, Hou J, Long Y, Zhang J, Zhou C, et al. Enhancing prediction of supraspinatus/infraspinatus tendon complex injuries through integration of deep visual features and clinical information: A multicenter two-round assessment study. *Insights into Imaging*. 2023;14(1):200. DOI: <https://doi.org/10.1186/s13244-023-01551-1>.
 12. Akiyama S, Nozaki T, Tasaki A, Horiuchi S, Hara T, Yamada K, et al. Longitudinal MR quantification of the fat fraction within the supraspinatus and infraspinatus muscles in patients with shoulder pain. *Academic Radiology*. 2022;29(11):1700–1708. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.acra.2022.02.011>.
 13. Brockmeyer M, Schmitt C, Hauptert A, Kohn D, Lorbach O. Limited diagnostic accuracy of magnetic resonance imaging and clinical tests for detecting partial-thickness tears of the rotator cuff. *Archives of Orthopaedic and Trauma Surgery*. 2017;137(12):1719–1724. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00402-017-2799-3>.
 14. Khatun Z, Jónsson H, Tsirilaki M, Maffulli N, Oliva F, Daval P, et al. Beyond pixel: Superpixel-based MRI segmentation through traditional machine learning and graph convolutional network. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*. 2024;256:108398. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cmpb.2024.108398>.
 15. Casula V, Kajabi AW. Quantitative MRI methods for the assessment of structure, composition, and function of musculoskeletal tissues in basic research and preclinical applications. *Magnetic Resonance Materials in Physics, Biology and Medicine*. 2024;37(6):949–967. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10334-024-01174-7>.
 16. Varriano G, Nardone V, Brunese M, Bruno M, Santone A, Brunese L, et al. An approach leveraging radiomics and model checking for the automatic early diagnosis of adhesive capsulitis. *Scientific Reports*. 2024;14(1):18878. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-69392-6>.
 17. He Z, Fang K, Lin X, Xiang CH, Li Y, Huang N, et al. Enhancing preoperative diagnosis of subscapular muscle injuries with shoulder MRI-based multimodal radiomics. *Academic Radiology*. 2024;32(2):907–915. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.acra.2024.09.049>.
 18. Janacova V, Szomolanyi P, Sitarcikova D, Kirner A, Trattinig S, Juras V. Texture analysis of cartilage repair tissue maturation: comparison of two cartilage repair methods and correlation with MOCART 2.0. *CARTILAGE*. 2025. DOI: <https://doi.org/10.1177/19476035241313047>.
 19. Väärälä A, Casula V, Panfilov E, Mobasheri A, Haapea M, Lammentaus-ta E, et al. Predicting osteoarthritis onset and progression with 3D texture analysis of cartilage MRI DESS: 6-year data from osteoarthritis initiative.

- Journal of Orthopaedic Research*. 2022;40(11):2597–2608. DOI: <https://doi.org/10.1002/jor.25293>.
20. Tian Z, Ni Y, He H, Tian B, Gong R, Xu F, et al. Quantitative assessment of rotator cuff injuries using synthetic MRI and IDEAL–IQ imaging techniques. *Heliyon*. 2024;10(17):e37307. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e37307>.
 21. Ahn TR, Yoon YC, Yoo JC, Kim HS, Lee JH. Diagnostic performance of conventional magnetic resonance imaging for detection and grading of subscapularis tendon tear according to Yoo and Rhee classification system in patients underwent arthroscopic rotator cuff surgery. *Skeletal Radiology*. 2022;51(3):659–668. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00256-021-03958-7>.
 22. Ni M, Chen W, Zhao Q, Zhao Y, Yuan H. Deep learning approach for MRI in the classification of anterior talofibular ligament injuries. *Journal of Magnetic Resonance Imaging*. 2023;58(5):1544–1556. DOI: <https://doi.org/10.1002/jmri.28649>.
 23. Ni M, Gao L, Chen W, Zhao Q, Zhao Y, Jiang C, et al. Preliminary exploration of deep learning-assisted recognition of superior labrum anterior and posterior lesions in shoulder MR arthrography. *International Orthopaedics*. 2024;48(1):183–191. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00264-023-05987-4>.
 24. Wang G, Han Y. Convolutional neural network for automatically segmenting magnetic resonance images of the shoulder joint. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*. 2021;200:105862. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cmpb.2020.105862>.
 25. Ni M, Zhao Y, Zhang L, Chen W, Wang Q, Tian C, et al. MRI-based automated multitask deep learning system to evaluate supraspinatus tendon injuries. *European Radiology*. 2024;34(6):3538–3551. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00330-023-10392-x>.
 26. Adams CR, Brady PC, Koo SS, Narbona P, Arrigoni P, Karnes GJ, et al. A systematic approach for diagnosing subscapularis tendon tears with pre-operative magnetic resonance imaging scans. *Arthroscopy: The Journal of Arthroscopic & Related Surgery*. 2012;28(11):1592–1600. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.arthro.2012.04.142>.
 27. Chen W, Lim LJR, Lim RQR, Yi Z, Huang J, He J, et al. Artificial intelligence powered advancements in upper extremity joint MRI: A review. *Heliyon*. 2024;10(7):e28731. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e28731>.
 28. Fei Y, Wan Y, Xu L, Huang Z, Ruan D, Wang C, et al. Novel methods to diagnose rotator cuff tear and predict post-operative Re-tear: Radiomics models. *Asia-Pacific Journal of Sports Medicine, Arthroscopy, Rehabilitation and Technology*. 2024;37;14–20. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.asmart.2024.03.003>.
 29. Fritz B, Yi PH, Kijowski R, Fritz J. Radiomics and deep learning for disease detection in musculoskeletal radiology: An overview of novel MRI-

- and CT-based approaches. *Investigative Radiology*. 2023;58(1):3–13. DOI: <https://doi.org/10.1097/RLI.0000000000000907>.
30. Alipour E, Chalian M, Pooyan A, Azhideh A, Zadeh FS, Jahanian H. Automatic MRI-based rotator cuff muscle segmentation using U-Nets. *Skeletal Radiology*. 2024;53(3):537–545. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00256-023-04447-9>.
 31. Tang R, Li Z, Jiang L, Jiang J, Zhao B, Cui L, et al. Development and clinical application of artificial intelligence assistant system for rotator cuff ultrasound scanning. *Ultrasound in Medicine & Biology*. 2024;50(2):251–257. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ultrasmedbio.2023.10.010>.
 32. Yao J, Chepelev L, Nisha Y, Sathiadoss P, Rybicki FJ, Sheikh AM. Evaluation of a deep learning method for the automated detection of supraspinatus tears on MRI. *Skeletal Radiology*. 2022;51(9):1765–1775. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00256-022-04008-6>.
 33. Malavolta EA, Assunção JH, Gracitelli MEC, Yen TK, Bordalo-Rodrigues M, Neto AAF. Accuracy of magnetic resonance imaging (MRI) for subscapularis tear: A systematic review and meta-analysis of diagnostic studies. *Archives of Orthopaedic and Trauma Surgery*. 2019;139(5):659–667. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00402-018-3095-6>.
 34. Kim SH, Yoo HJ, Yoon SH, Kim YT, Park SJ, Chai JW, et al. Development of a deep learning-based fully automated segmentation of rotator cuff muscles from clinical MR scans. *Acta Radiologica*. 2024;65(9):1126–1132. DOI: <https://doi.org/10.1177/02841851241262325>.
 35. Guo D, Liu X, Wang D, Tang X, Qin Y. Development and clinical validation of deep learning for auto-diagnosis of supraspinatus tears. *Journal of Orthopaedic Surgery and Research*. 2023;18(1):426. DOI: <https://doi.org/10.1186/s13018-023-03909-z>.
 36. Shim E, Kim JY, Yoon JP, Ki SY, Lho T, Kim Y, et al. Automated rotator cuff tear classification using 3D convolutional neural network. *Scientific Reports*. 2020;10(1):15632. DOI: <http://doi.org/10.1038/s41598-020-72357-0>. Erratum in: *Scientific Reports*. 2021;11(1):15996. DOI: <http://doi.org/10.1038/s41598-021-95469-7>.
 37. Prudnikov Y, Yuryk O, Sosnov M, Stashkevych A, Martysyniak S. Use of artificial intelligence in the diagnosis and treatment of orthopedic diseases: Literature review. *Georgian Medical News*. 2024;(9):19–31. PMID: <https://pubmed.gov/39580822>.

Информация об авторах

Наталья Сергеевна Шабарова  — студент института хирургии, Уральский государственный медицинский университет, Екатеринбург, Россия.

E-mail: tashabaroval@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-6606-9252>

Александр Андреевич Жилияков — студент института хирургии, Уральский государственный медицинский университет, Екатеринбург, Россия.

E-mail: alexandrusma@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5251-0411>

Андрей Викторович Жилияков — доктор медицинских наук, доцент кафедры травматологии и ортопедии, институт хирургии, Уральский государственный медицинский университет, Екатеринбург, Россия.

E-mail: doctor-zhilyakov@rambler.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1261-3712>

Елена Александровна Волокитина — доктор медицинских наук, профессор, заведующий кафедрой травматологии и ортопедии, институт хирургии, Уральский государственный медицинский университет, Екатеринбург, Россия.

E-mail: volokitina_elen@rambler.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5994-8558>

Information about the authors

Natalia S. Shabarova  — Student at the Institute of Surgery, Ural State Medical University, Ekaterinburg, Russia.

E-mail: tashabarova1@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-6606-9252>

Alexander A. Zhilyakov — Student at the Institute of Surgery, Ural State Medical University, Ekaterinburg, Russia.

E-mail: alexandrusma@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5251-0411>

Andrey V. Zhilyakov — Doctor of Sciences (Medicine), Associate Professor of the Department of Traumatology and Orthopedics, Institute of Surgery, Ural State Medical University, Ekaterinburg, Russia.

E-mail: doctor-zhilyakov@rambler.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1261-3712>

Elena A. Volokitina — Doctor of Sciences (Medicine), Professor, Head of the Department of Traumatology and Orthopedics, Institute of Surgery, Ural State Medical University, Ekaterinburg, Russia.

E-mail: volokitina_elen@rambler.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5994-8558>