

M.V. Saushkin – Orthopedic traumatologist, oncologist
E.A. Volokitina – Doctor of Sciences (Medicine), Professor
*Автор ответственный за переписку (Corresponding author):
gorunovavaleria10@gmail.com

УДК: 616.72-007.248

РАДИОМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ МРТ-ИЗОБРАЖЕНИЙ ДЛЯ ОЦЕНКИ ВОЗМОЖНОСТИ ИЗУЧЕНИЯ ВНУТРИКОСТНЫХ МОДИФИКАЦИЙ И СТЕПЕНИ ПОВРЕЖДЕНИЯ ВРАЩАТЕЛЬНОЙ МАНЖЕТЫ ПРИ ИМПИНДЖМЕНТ-СИНДРОМЕ (ПИЛОТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ)

Жилияков Александр Андреевич¹, Волокитина Елена Александровна^{1,2}

¹Кафедра травматологии и ортопедии

ФГБОУ ВО «Уральский государственный медицинский университет» Минздрава России

²ГАУЗ СО «Свердловская областная клиническая больница №1»

Екатеринбург, Россия

Аннотация

Введение. Импинджмент синдром плечевого сустава приводит к боли и ограничениям функций, вызывая ремоделирование костных структур. Диагностика с помощью МРТ предпочтительнее и позволяет провести анализ радиомических признаков. **Цель исследования** – оценка возможности применения анализа текстурных данных костных структур и сухожилий плечевого сустава методом радиомического анализа. **Материал и методы.** В исследование участвовали пациенты с полным и неполным разрывом сухожилия манжеты, частичным разрывом бицепса и пациент без повреждений. **Результаты.** Были анализированы текстурные параметры 4 ROI, изменения наблюдались во всех структурах, в области акромиона и головки плечевой кости. **Выводы.** Данное пилотное исследование подтверждает целесообразность продолжения изучения особенностей радиомических параметров на МРТ изображениях.

Ключевые слова: МРТ, радиомика, импинджмент-синдром, вращательная манжета, Entropy, Contrast, Energy, и Correlation.

RADIOMIC ANALYSIS OF MRT IMAGES TO ASSESS THE FEASIBILITY OF STUDYING INTRAOSSEOUS MODIFICATIONS AND DEGREE OF ROTATOR CUFF INJURY IN IMPINGEMENT SYNDROME (PILOT STUDY)

Jiliakov Aleksandr Andreevich, Volokitina Elena Aleksandrovna^{1,2}

¹Department of Traumatology and Orthopaedics

Ural State Medical University

²Sverdlovsk Regional Clinical Hospital

Yekaterinburg, Russia

Abstract

Introduction. Impingement syndrome of the shoulder joint leads to pain and limitation of function, causing remodelling of bony structures. Diagnosis by MRI is preferred and allows analysis of radiomic features. **The aim of this study** is to evaluate the feasibility of applying texture data analysis of bony structures and tendons of the shoulder joint by radiomic analysis. **Material and methods.** Patients with complete and incomplete cuff tendon rupture, partial biceps tendon rupture and patient without injury were included in the study. **Results.** Textural parameters of 4 ROIs were analysed, changes were observed in all structures, in the region of the acromion and head of the humerus. **Conclusion.** This pilot study confirms the feasibility of continuing to study the features of radiomic parameters on MR images.

Keywords: MRI, radiomics, impingement syndrome, rotator cuff, Entropy, Contrast, Energy, and Correlation.

ВВЕДЕНИЕ

Патогенез импинджмент синдрома плечевого сустава включает в себя сдавливание и соударение таких структур, как вращательная манжета, сухожилие двуглавой мышцы и бурсы между акромионом и головкой плечевой кости, а также клювовидного отростка, во время движений рукой, вызывая боль и функциональные ограничения. Длительное сохранение этого состояния является причиной ремоделирования и реструктуризации костных структур плечевого сустава, по аналогии с остеоартритом коленного сустава. Эти трансформации представлены образованием не только остеофитов, но и изменением плотности костной ткани и формированием внутрикостных кист.

Данные патологические модификации могут быть обнаружены с помощью диагностических методов, таких как магнитно-резонансная томография (МРТ) и компьютерная томография (КТ). Однако для диагностики природы импичмент синдрома плечевого сустава МРТ предпочтительнее КТ из-за ее возможности визуализации мягких тканей, включая разрывы вращательной манжеты и тендинит, которые невозможно выявить с помощью обычной артрографии или компьютерной томографии. Кроме того, МРТ позволяет оценить состояние суставной губы, капсуло-связочных структур и выявить нестабильность сустава, предоставляя более подробную информацию о внутрисуставных структурах.

Внутрикостные кисты на МРТ изображениях выглядят как четко очерченные области с низкой интенсивностью сигнала на T1-взвешенных изображениях и высокой интенсивностью сигнала на T2-взвешенных изображениях. А склероз визуализируется на МРТ в виде областей повышенной плотности кости или пониженной интенсивности сигнала на T1-взвешенных изображениях и повышенной интенсивности сигнала на T2-взвешенных изображениях. Эти особенности значительно влияют на локальную текстуру костной ткани, поскольку в этом признаке учитывается не только интенсивность сигнала, но и однородность, контраст, окружение, а также градиент серого цвета [7].

Изучение текстурных признаков заключается не только в выявлении и различении внутрикостных кист и областей склероза, но при проведении количественного анализа, где измерения текстурных параметров могут указывать на степень поражения и уточнять дегенеративную или воспалительную этиологию модификации костной ткани [7]. Применение алгоритмов машинного обучения и глубокого обучения для анализа текстурных признаков на МРТ изображениях открывает новые перспективы в диагностике и контроле эффективности лечения заболеваний опорно-двигательного аппарата

Однако, следует отметить, что вопрос связи внутрикостных изменений в плечевом суставе, вызываемых патологическими изменениями вращательной манжеты, пока еще не полностью изучен. Не существует достаточного количества научных публикаций по изучению текстуры МРТ-изображений плечевого сустава при различных его патологиях, что ограничивает глубину нашего понимания этого вопроса. Дальнейшие исследования в этой области могут выявить важные взаимосвязи и помочь в разработке новых подходов к диагностике и контролю эффективности лечения патологий плечевого сустава.

Цель исследования данной пилотной работы – оценка возможности анализа текстурных данных костных структур и сухожилий плечевого сустава методом радиомического анализа.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Гипотеза: существует прямая зависимость между повреждением сухожилия и изменениями текстурных параметров суставных концов костей, образующих плечевой сустав. Увеличение степени повреждения сухожилия влияет на выраженность и разброс значений текстурных параметров (например, контрастности, однородности, энтропии), вследствие реактивного формирования внутрикостных кист или субхондрального склероза.

Объекты исследования: Мы провели одномоментное ретроспективное исследование, в которое были включены 7 обезличенных цифровых архивов МРТ исследований плечевого суставов и соответствующих им протоколов. В данной когорте, на основании прилагающегося заключения, выделены следующие подгруппы: 1) пациенты, с полным разрывом сухожилия вращательной манжеты ($n = 3$); 2) пациенты, с неполным разрывом сухожилия вращательной манжеты ($n = 3$); 3) без значимых повреждений ($n = 1$). Результаты извлечения данных текстурных параметрах пациента из 3 группы приняты нами как реперные значения. Критерии включения состояли из наличия релевантных, подтвержденных МРТ визуализацией, повреждений и подтверждающего их текста заключения. Критериями исключения были множественные дегенеративные и травматические повреждения вращательной манжеты; состояние после операций на плечевом суставе и сочетанные нетематические патологии.

Методы МРТ: В эксперименте использовались протоколы исследований, выполненных на аппарате SIGNA Voyager от GE MEDICAL SYSTEMS с магнитной

индукцией 1,5 Тесла, что обеспечило достаточное пространственное разрешение и отношение сигнал-шум для детализации анатомии левого плечевого сустава. С целью оптимизации качества изображений и улучшения пространственного разрешения использовалась 16-канальная приемная катушка, специализированно предназначенная для исследований левого плеча. МРТ-протокол включал комбинацию различных последовательностей, адаптированных для максимально подробного изображения анатомических и патологических изменений в области интереса, что существенно повысило информативность исследования. Толщина среза была адаптирована и составила 3,5 мм, что способствовало получению высококачественных изображений с хорошим разрешением.

Изучались МРТ изображения полученные в режиме T2-сканирования в аксиальной плоскости, поскольку при этих условиях последовательно и наиболее четко визуализируются все сухожилия вращательной манжеты и костные ткани, участвующие в процессе движения верхней конечности в плечевом суставе. А измерение времени релаксации в T2 режиме предоставляет информацию о содержании воды во внеклеточном матриксе и архитектуре коллагеновых волокон в сухожилиях, включая их ориентацию. Данный метод был валидирован и признан воспроизводимым в многочисленных исследованиях. Особое внимание при сегментации изображений костных структур уделялось качеству изображений, оказывающему значимое влияние на последующий текстурный анализ.

Определение границ сегментации: Повреждения сухожилий и изменение траектории движения головки плечевой кости способствуют образованию кист внутри костного вещества и склероза суставных поверхностей головки плечевой кости до хирургической шейки, акромиона, шейки лопатки, а также клювовидного отростка, поскольку механическое напряжение и деформации измененного сухожилия подлопаточной мышцы могут вызывать аналогичные модификации. Регионы интереса (ROI) выбранных для анализа костных структур: маркировались специальными средствами в программе LIFEx 7.5.10 [4]. Границы сегментации определялись согласно протоколу разметки анатомических образований в области плечевого сустава, предложенных в 2021 American College of Radiology (ACR) [1].

Анализ текстурных признаков: Текстурный анализ в программной среде LIFEx 7.5.10 был выполнен с использованием таких радиомических параметров как энтропия, контраст, энергия, однородность и корреляция (Entropy; Contrast; Energy; Homogeneity; Correlation). Данные параметры были исследованы в различных группах текстурных объектов, включая матрицы совпадения уровней серого (GLCM), матрицы длины пробега уровня серого (GLRLM), матрицы зон размера уровня серого (GLSZM), матрицы зон расстояния уровня серого (GLDZM), матрицы разности оттенков серого по соседству (NGTDM) и матрицы зависимости уровня серого по соседству (NGLDM) [3]. Выбор указанных радиомических параметров обусловлен их потенциальной способностью отражать изменения в костной ткани, связанные с импинджмент синдромом. Например, параметр Energy обеспечивает меру однородности текстуры, Contrast отражает изменение уровней интенсивности между пикселями изображения, Correlation мера степени линейных связей между пикселями на изображении, Entropy мера случайности распределения уровней серого.

Статистический анализ: В связи с малой выборкой и пилотным характером исследования методы статистического анализа не использовались. В подгруппах 1 и 2 использовались среднеарифметические значения текстурных параметров.

Этические принципы: Исследование было ретроспективным с использованием анонимизированных данных. Все участники исследования в свое время дали письменное информированное согласие на использование результатов диагностики в клинических и учебных исследованиях.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В нашем исследовании мы анализировали текстурные параметры 4 ROI, учитывая степень повреждения сухожилий. Мы сравнивали состояния без повреждений, с частичным и полным повреждением, всего было использовано 18 параметров. Мы использовали различные методы измерения для оценки изменений в структурах, такие как: подсчет объема,

аппроксимацию объема, подсчет вокселей, а также анализ интенсивности энергии и различные методы корреляционного анализа.

Значения выбранных параметров в области акромиона продемонстрировали значительные изменения в группе полного разрыва сухожилия вращательной манжеты, по сравнению с пациентом без значимых повреждений, с наиболее выраженным увеличением объема до 303.25%, что также подтверждается аппроксимацией объема и подсчетом вокселей с аналогичными результатами. Интенсивность, базирующаяся на энергии и автокорреляция серого для данной структуры составила 198,54% и 54,61% соответственно. Значительные различия наблюдались и в характеристиках клювовидного отростка, где интенсивность энергии достигла 78.79%, выраженность автокорреляции – 65,77%, а морфологические параметры, такие как объем, продемонстрировали свое уменьшение до 38,26%. Анализ шейки лопатки показал менее выраженные изменения, с автокорреляцией в 43% и некоторыми изменениями в соотношении площади поверхности к объему, что указывает на слабую структурную модификацию в этой анатомической области. Для головки плеча характерно наибольшее колебание значений контраста (NGTDM) на уровне 54%, что обусловлено возникающей вариабельностью текстуры и структурной неоднородностью, данной региона. Этот результат дополняется интенсивностью энергии в 46,51% и изменениями в корреляции и воксельной структуре. Например, шейки лопатки показывает снижение параметра GLCM_Autocorrelation на 43% при полном повреждении. В области головки плечевой кости демонстрирует увеличение параметра NGTDM_Contrast на 54%. В регионе клювовидного отростка зафиксировано увеличение параметра INTENSITY-BASED_IntensityBasedEnergy на 79%.

ОБСУЖДЕНИЕ

Изменение показателей Entropy, Contrast, Energy, и Correlation согласуется с результатами исследования Zaworski где изучались текстуры трабекулярной кости на основе МРТ изображений, анализ текстуры показал, что данные радиомические признаки отражают изменения в трабекулярной кости [5]. Результаты нашего исследования позволяют сделать вывод о значительном влиянии нарушения сухожильного аппарата на состояние костных структур плечевого сустава, что проявляется разнонаправленными изменениями значений текстурных параметров. Изменения этих параметров могут быть использованы для оценки тяжести повреждения и дальнейшего анализа механизмов возникновения условий и возможных стратегий восстановления. Наблюдаемые изменения могут служить основанием для дальнейшего исследования механизмов повреждений и процессов восстановления в данных анатомических зонах. Текстурные параметры помогают оценить повреждения и процесс восстановления [3]. С помощью МРТ снимков можно визуализировать мягкие ткани и кости, позволяя точно определить синдромы соударения.

В работе [6] особое внимание уделялось важности выявления внутрикостных изменений при патологии вращательной манжеты важны для диагностики и лечения, а также менее выраженные изменения в меньшей бугристости, являются значимыми индикаторами для диагностики и планирования лечения.

Исследования в области радиомики повышают точность и эффективность диагностики, а также открывают новые возможности для анализа МРТ. Большой объём данных позволит применять машинное и глубокое обучение для обнаружения сложных закономерностей и оценки степени поражения костной ткани [3].

Следующим этапом, после глубокого обучения будет автоматизация анализа МРТ, которое ускорит диагностику, снизит риск ошибок. Эти методы — основа персонализированного подхода к диагностике и контролю лечения. Они учитывают состояние костно-мышечной системы и позволяют анализировать динамику. Технологии важны для выбора стратегии лечения и оценки эффективности. Информация о динамике помогает принимать обоснованные решения о необходимости операции или консервативного лечения. Современные исследования направлены на разработку и улучшение алгоритмов глубокого обучения, интеграцию радиомики и клинической информации, автоматизацию анализа МРТ-

изображений [2]. Развитие алгоритмов оптимизирует рабочие процессы и ускоряет анализ, но требует затрат и может быть неточным при неоднородных данных.

Интеграция радиомики и клинических данных помогает создавать точные модели прогнозирования и определять лучшие методы лечения. Это позволяет выявлять сложные паттерны на изображениях и учитывать историю болезни пациента. Однако это требует обработки больших объемов данных, что может вызвать проблемы с конфиденциальностью и безопасностью данных.

Инструменты для анализа МРТ-изображений улучшают диагностику и обслуживание пациентов, снижая нагрузку на медперсонал. Однако риск ошибок в алгоритмах машинного обучения требует юридической ответственности для защиты пациентов и специалистов.

ВЫВОДЫ

В ходе пилотного исследования были получены следующие выводы:

1. Наибольшие изменения были получены в области акромиона, объём у пациентов с полным разрывом сухожилия вращательной манжеты увеличился до 303% по сравнению с пациентом без разрыва. Интенсивность, базирующаяся на энергии и автокорреляция серого для данной структуры составила 198,54% и 54,61% соответственно
2. В области головки плечевой кости демонстрирует увеличение параметра NGTDM_Contrast на 54% относительно пациента без повреждений.
3. В области клювовидного отростка зафиксировано увеличение параметра INTENSITY-BASED_IntensityBasedEnergy на 79%, относительно пациента без повреждений.
4. Данный метод позволяет избежать субъективности и добиться более точных результатов, чем сравнение полуколичественных характеристик исследований.
5. Методы количественного анализа могут определить степень поражения костной ткани, что поможет в выборе наиболее подходящего лечения для каждого случая.
6. Такой перспективный метод имеет важное значение для диагностики, отслеживания состояния и разработки терапевтических подходов при заболеваниях плечевого сустава.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Ayasrah M. Quality assessment of shoulder MRI according to practice parameters of American College of Radiology: A multi-center study in Jordan / M. Ayasrah, I. Qtaish // *Journal of Medicine and Life*. – 2023. – Т. 16. – № 3. – С. 412-418.
2. Deep Learning Diagnosis and Classification of Rotator Cuff Tears on Shoulder MRI / D. J. Lin, M. Schwier, B. Geiger [и др.] // *Investigative Radiology*. – 2023. – Т. 58. – № 6. – С. 405-412.
3. Introduction to radiomics / M. E. Mayerhoefer, A. Materka, G. Langs [et al.] // *Journal of Nuclear Medicine*. – 2020. – Т. 61. – № 4. – С. 488-495.
4. Lifex: A freeware for radiomic feature calculation in multimodality imaging to accelerate advances in the characterization of tumor heterogeneity / C. Nioche, F. Orlhac, S. Boughdad [et al.] // *Cancer Research*. – 2018. – Т. 78. – № 16. – С. 4786-4789.
5. MRI-based Texture Analysis of Trabecular Bone for Opportunistic Screening of Skeletal Fragility / C. Zaworski, J. Cheah, M. F. Koff [et al.] // *The Journal of Clinical Endocrinology & Metabolism*. – 2021. – Т. 106. – № 8. – С. 2233-2241.
6. Radiomics in medical imaging—“how-to” guide and critical reflection / J. E. van Timmeren, D. Cester, S. Tanadini-Lang [и др.] // *Insights into Imaging*. – 2020. – Т. 11. – № 1.
7. Radiomics Texture Analysis of Bone Marrow Alterations in MRI Knee Examinations / S. Kostopoulos, N. Boci, D. Cavouras [et al.] // *Journal of Imaging*. – 2023. – Т. 9. – № 11.

Сведения об авторах

А.А. Жиликов* – студент

Е.А. Волокитина – заведующий кафедрой, доктор медицинских наук, профессор

Information about the authors

A.A. Jiliakov * – Student

E.A. Volokitina – Doctor of Sciences (Medicine), Professor

*Автор, ответственный за переписку (Corresponding author):

alexandrusma@mail.ru