

<https://doi.org/10.29001/2073-8552-2023-39-3-13-22>
УДК 616.12-073.86

Радиомический анализ магнитно-резонансных изображений сердца: обзор литературы

А.С. Максимова, В.Ю. Усов, Т.А. Шелковникова, О.В. Мочула,
Н.И. Рюмшина, А.Е. Сухарева, К.В. Завадовский

Научно-исследовательский институт кардиологии, Томский национальный исследовательский медицинский центр
Российской академии наук,
634012, Российская Федерация, Томск, ул. Киевская, 111а

Аннотация

Радиомика и текстурный анализ (ТА) – это новое, бурно развивающееся направление углубленного анализа цифровых медицинских изображений. Число публикаций по данной тематике растет с каждым годом, и данная тема не теряет своей актуальности. Радиомика представляет собой многообещающий метод анализа изображений, который направлен на то, чтобы улучшить диагностику и прогноз заболеваний за счет извлечения большого числа количественных признаков, которые могут быть пропущены человеческим глазом при визуальном анализе изображений. Биомаркеры радиомики, полученные путем извлечения данных из магнитно-резонансных изображений сердца, могут стать ценным инструментом для оценки жизнеспособности миокарда, поражения миокарда при миокардитах и кардиомиопатиях. Проанализированы возможности применения ТА изображений магнитно-резонансной томографии (МРТ) сердца в клинической практике, описаны известные на сегодняшний день особенности, преимущества и ограничения применения ТА и радиомики в диагностике заболеваний сердца, а именно инфаркта миокарда (ИМ), миокардита и кардиомиопатии.

Ключевые слова:	магнитно-резонансная томография сердца, миокардит, инфаркт миокарда, кардиомиопатия, радиомика, текстурный анализ.
Конфликт интересов:	авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
Прозрачность финансовой деятельности:	никто из авторов не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.
Для цитирования:	Максимова А.С., Усов В.Ю., Шелковникова Т.А., Мочула О.В., Рюмшина Н.И., Сухарева А.Е., Завадовский К.В. Радиомический анализ магнитно-резонансных изображений сердца: обзор литературы. <i>Сибирский журнал клинической и экспериментальной медицины</i> . 2023;39(3):13–22. https://doi.org/10.29001/2073-8552-2023-39-3-13-22 .

Cardiac MRI Radiomics: review

Aleksandra S. Maksimova, Wladimir Yu. Ussov, Tatyana A. Shelkovnikova,
Olga V. Mochula, Nadezhda I. Ryumshina, Anna E. Sykhareva,
Konstantin V. Zavadovsky

Cardiology Research Institute, Tomsk National Research Medical Center, Russian Academy of Sciences, Tomsk, Russia,
111a, Kievskaya str., Tomsk, 634012, Russian Federation

Abstract

A study of foreign and domestic literature devoted to the application of texture analysis of magnetic resonance images of the heart was performed. The analysis included publications selected by key words and their combinations: cardiac magnetic resonance imaging (MRI), myocarditis, myocardial infarction, cardiomyopathy, radiomics, and texture analysis. Radiomics and texture analysis, as a new and rapidly developing direction of in-depth analysis of digital medical images, is developing, the number of publications on this topic is growing every year and the topic is not losing its relevance. Radiomics is a promising method of image analysis that aims to improve the diagnosis and prognosis of diseases by extracting a large number of

✉ Максимова Александра Сергеевна, e-mail: asmaksimova@yandex.ru.

quantitative features that can be missed by the human eye in the visual analysis of images. Radiomics biomarkers derived by extracting data from magnetic resonance images of the heart could be a valuable tool for assessing myocardial viability, myocardial lesions in myocarditis and cardiomyopathies.

Keywords:	cardiac MRI, myocarditis, myocardial infarction, cardiomyopathy, radiomics, textural analysis.
Conflict of interest:	the authors declare no conflict of interest.
Financial disclosure:	none of the authors has a financial interest in the presented materials or method.
For citation:	Maksimova A.S., Ussov W.Yu., Shelkovnikova T.A., Mochula O.V., Ryumshina N.I., Sykhareva A.E., Zavadovsky K.V. Cardiac MRI Radiomics: review. <i>The Siberian Journal of Clinical and Experimental Medicine</i> . 2023;38(3):13–22. https://doi.org/10.29001/2073-8552-2023-38-3-13-22 .

Введение

Радиомика и текстурный анализ (ТА) – это новое, бурно развивающееся направление углубленного анализа цифровых медицинских изображений, основной целью которого является обнаружение и количественная оценка особенностей изображений, чаще всего невидимых человеческому глазу, но способных характеризовать патофизиологические и патоморфологические процессы, происходящие в органах и тканях. Радиомика признается перспективным дополнением качественной интерпретации лучевых изображений в диагностике и прогнозе различных заболеваний [1–3].

Подавляющее число исследований по радиомике относятся к онкологии [1, 4–7], где с помощью данного подхода решаются классификационные либо прогностические задачи. Основанные на ТА классификации предполагают разделение исследуемой выборки на категории: по характеру течения (доброкачественные, злокачественные), стадийности опухолевого процесса и наличию метастазов, определению геномного статуса и т. д. Прогностические модели используют радиомические данные для стратификации пациентов на различные группы риска в зависимости от возникновения тех или иных конечных точек, например, таких как общая или безрецидивная выживаемость [8].

Кроме онкологической направленности исследований радиомика также заняла свою нишу в области нейровизуализации, в частности в диагностике нейродегенеративных расстройств. Особое внимание уделяется радиомическим показателям головного мозга у пациентов с болезнями Альцгеймера и Паркинсона [9, 10]. Текстульные особенности патологических изменений головного мозга при данных дегенеративных заболеваниях характеризуют отложение амилоидных белков в гиппокампе, мозолистом теле, таламусе [10].

В кардиовизуализации опыт применения радиомики ограничен. Возможности эхокардиографии при создании радиомических моделей для дифференциации различных состояний, таких как амилоидоз сердца [11], миокардит [12], гемохроматоз [13] и др. [14, 15], были продемонстрированы в отдельных исследованиях. Однако применение ТА в эхокардиографии не нашло широкого применения в клинической практике. В последние годы отмечается рост исследований в области радиомического анализа изображений сердца, сделанных с помощью компьютерной томографии (КТ), в которых ТА используется для выявления дополнительных характеристик коронарных бляшек [16–18] и периваскулярного жира [19–21] что выдвигает на первый план потенциал радиомики

для получения клинически важных результатов в области неинвазивной визуализации сердечно-сосудистых заболеваний.

Кроме этого существуют немногочисленные исследования, демонстрирующие потенциал радиомики в области магнитно-резонансной томографии (МРТ) сердца [22–24]. К этому предрасполагает ряд факторов: 1. МРТ дает информацию в широком спектре интенсивности сигнала вокселей, что собственно и является основой для радиомического анализа; 2. МРТ обладает достаточной разрешающей способностью, чтобы обеспечить необходимый для радиомического анализа объем данных; 3. В отличие от КТ при МРТ сердца возможно получение серии изображений, отражающих разные патологические процессы: кино-МРТ – сократимость, T2 – отек, раннее контрастное усиление (T1) – гиперемия, отсроченное контрастное усиление – фиброз / некроз, T2-картирование – воспалительные изменения миокарда, T1-картирование с определением ECV – диффузный фиброз и другие изменения миокарда. Каждую из этих последовательностей можно подвергать радиомическому анализу с получением уникальных текстурных характеристик, позволяющих улучшать точность диагностики.

В отдельных исследованиях уже показано успешное применение радиомического анализа неконтрастных МР-изображений сердца для выявления, дифференциации и диагностики кардиомиопатий [25, 26] и инфаркта миокарда (ИМ) [27]. При этом даже ограниченный объем литературы по применению ТА при МРТ сердца предполагает, что декодирование фенотипа изображения с помощью анализа текстуры может обеспечить дополнительную ценность в выявлении патологии на тканевом уровне с потенциалом для понимания патофизиологии заболевания. С ростом интереса к этой области возникает необходимость четкого понимания радиомического анализа МРТ сердца, его проблем и ограничений с тем, чтобы можно было делать надежные выводы.

Цель: систематизировать современное состояние исследований в области радиомики и ТА при МРТ сердца, которые позволяют проводить первичную и дифференциальную диагностику патологии миокарда.

Методы литературного поиска

Для анализа имеющихся на сегодняшний день данных по радиомике МРТ сердца был проведен поиск в базах данных (Elibrary, Pubmed, Scopus), используя следующие ключевые слова, их комбинации и англоязычные аналоги: МРТ сердца, миокардит, ИМ, кардиомиопатия, радиомика, ТА. Поиск проводился до конца 2022 г. и включал

все исследования, опубликованные до этой даты. Было найдено 466 статей. Из них были исключены публикации, где радиомика упоминается в списке литературы, исследования по радиомическому анализу эхокардиографических изображений и изображений КТ сердца. Из оставшихся 43 – оригинальные работы; 21 – обзоры.

Описание метода радиомического анализа данных МРТ сердца

Радиомический анализ может быть применен к любым последовательностям, выполняемым в рамках рутинной клинической МРТ сердца. Основными факторами, определяющими качество МР-изображений и оказывающими наибольшее влияние на ТА, выполняемый при МРТ сердца, являются пространственное разрешение и отношение сигнал / шум [28]. Артефакты или некачественная визуализация могут ухудшить результаты радиомического анализа изображений. Процесс получения радиомических данных включает несколько последовательных и взаимосвязанных этапов: предварительную обработку данных, идентификацию области интереса, сегментацию, извлечение данных, моделирование, статистическую обработку и анализ полученных данных (рис. 1) [29].

На начальном этапе выполняется предварительная обработка изображений для придания однородности изображениям, которые по своей природе могут быть неоднородными из-за различий в аппаратах МРТ и параметрах визуализации. Этот этап, включающий в себя нормализацию интенсивности изображения и сглаживание шума, может облегчить эффективный количественный анализ изображений и сделать результаты радиомики более воспроизводимыми [30].

Далее в зависимости от целей исследования осуществляется выделение одной или нескольких зон интереса (ROI – region of interest – для двумерных или VOI – volume of interest – для трехмерных данных), что является решающим этапом, который предшествует извлечению текстурных характеристик [31]. Процесс сегментации, который может быть выполнен вручную, полуавтоматически или автоматически с помощью программного обеспечения, включая механизмы машинного обучения, является одним из наиболее важных этапов, т. к. точность сегментации будет определять радиомические признаки, которые будут извлекаться из полученного изображения. Различия в сегментации между алгоритмами и операторами могут привести к ошибке при создании радиомической карты для одной и той же области интересов [32].

Извлечение данных – это следующий шаг радиомического анализа, на котором происходит выделение признаков и формирование набора дескрипторов, характеризующих изображение. Существуют различные подходы формирования наборов таких цифровых признаков, которые в свою очередь делятся на геометрические (линейный размер, площадь, форма и т. д.); признаки первого порядка (гистограммные признаки, описывающие статистические свойства пикселей выделенной области изображения) – максимальное, минимальное, среднее и медианное значения интенсивности в выделенной области, среднеквадратичное отклонение от среднего значения, асимметрия распределения; признаки второго порядка – текстурные признаки корреляции значений соседних пикселей и однородности выделенной области [33]. Признаки более высоких порядков описывают статистические особенности изображений, полученных из исходных дан-

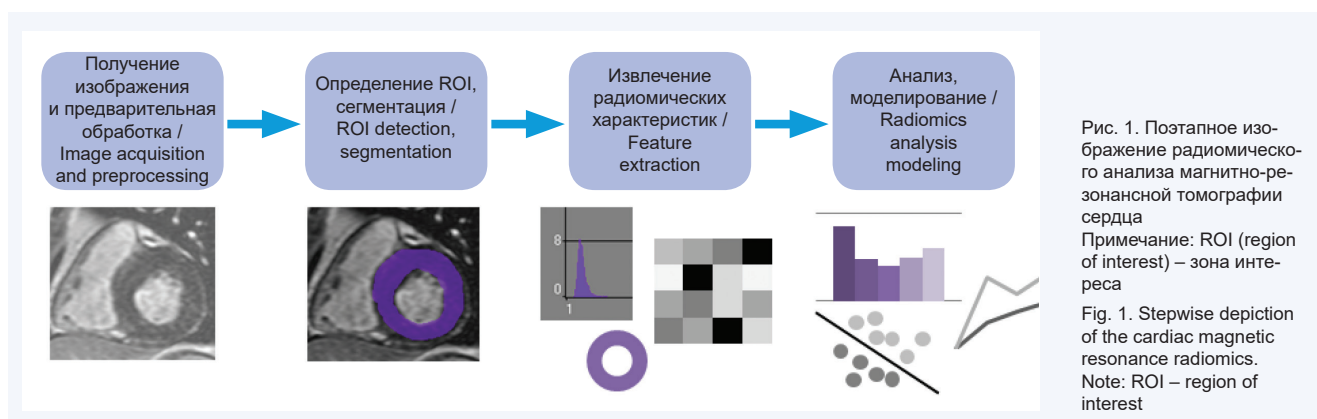
ных, путем применения различных математических операций: преобразования Фурье, вейвлет-анализа, а также различных фильтров [34].

Многие из извлеченных на предыдущем этапе функций являются избыточными. Поэтому далее в первую очередь выделяются данные с потенциальным клиническим применением. Двумя наиболее часто используемыми подходами в данном случае являются кластерный анализ и метод главных компонент (PCA – Principal component analysis) [35].

Математические методы, которые используются для построения моделей, – это в первую очередь наиболее популярные и востребованные нейронные сети, но кроме них существуют, например, деревья решений, которые могут работать сопоставимо с нейронными сетями и в каких-то случаях являются более интерпретируемыми. Для оценки модели используются различные методы: в случае бинарной классификации – ROC-анализ; если необходимо предсказать риски рецидива, спрогнозировать выживаемость, используется C-index (Concordance Index). Кластерный анализ направлен на создание групп сходных признаков (кластеров) с высокой внутрикластерной избыточностью и низкой межкластерной корреляцией. Этот тип анализа обычно изображается кластерной тепловой картой. Метод главных компонент стремится создать меньший набор максимально некоррелируемых переменных из большого набора коррелируемых переменных [36]. Графически выходные данные PCA состоят из оценочных графиков, дающих представление о группировке в наборах данных по сходству.

После того как изображение охарактеризовано несколькими десятками чисел и отобраны максимально информативные дескрипторы, создается математическая модель. При этом необходимо учитывать, что слишком простая модель не справится с поставленной задачей разделения признаков, и, наоборот, если модель очень сложная и состоит из большого количества параметров, она будет идеальной, но при этом будет плохо работать на новых примерах, с которыми она еще не сталкивалась. В оптимальном случае нужно найти определенную грань, чтобы модель не была слишком простой, обеспечивая безупречную работу, но и не слишком сложной, не переходя так называемое переобучение. С точки зрения методологии, модель должна быть валидирована, т. е. после того, как получили модель по данным одной клиники, она должна также хорошо работать на другой выборке пациентов [31].

В случае радиологической визуализации применение искусственного интеллекта варьируется от быстрой сегментации структуры до вероятностного расчета диагноза и оценки прогноза [29]. При этом разрабатываются алгоритмы, способные анализировать данные и их свойства с использованием различных инструментов, которые имеют тенденцию улучшаться или «обучаться» по мере поступления новых данных – так называемое машинное обучение, которое является областью искусственного интеллекта. Для этого модель с соответствующим набором данных обучается принимать решение на основе predetermined правил [37]. Таким образом, модели машинного обучения могут вырабатывать сложные отношения в больших объемах данных. Однако для этого требуется структурирование и описание набора данных, а также проверка экспертом, так называемое «контролируемое обучение». В таблице представлен краткий обзор исследований, изучающих применение радиомики и ТА в области МРТ сердца.



Текстурный анализ при миокардитах

Несмотря на то, что своевременная и правильная диагностика миокардита представляет собой первый шаг к индивидуальной терапевтической стратегии для снижения риска прогрессирования хронического либо активного воспаления и / или дилатационной кардиомиопатии (ДКМП), диагностика миокардита остается одной из самых сложных задач в клинической кардиологии. Радиомический подход в данном случае является перспективным методом современной лучевой диагностики. Результаты МР-диагностики миокардита обычно оценивают по критериям Lake Louise, которые направлены на анализ признаков воспаления миокарда с помощью T2-взвешенной визуализации отека, оценки гиперемии (на основе данных раннего контрастного усиления), и визуализации фиброза, по данным отсроченного контрастирования [38].

Несмотря на относительно высокую точность применяемых критериев, диагностика миокардита на сегодняшний день остается сложной задачей. Для получения дополнительной информации, позволяющей подтвердить наличие миокардита, оцениваются анамнестические данные пациента, возрастание активности кардиоспецифических ферментов, наличие дисфункции левого желудочка (ЛЖ) и наличие перикардального выпота.

Возможности радиомики как способа повышения диагностической точности в постановке диагноза миокардита по данным МРТ сердца были показаны в работе B. Baessler и соавт. [27, 39]. Авторы обнаружили, что методы ТА имеют большую диагностическую эффективность, чем стандартные критерии Lake Louise. С помощью радиомики удалось дифференцировать острый миокардит от неповрежденной сердечной ткани со 100% чувствительностью и 96% специфичностью по сравнению с использованием критериев Lake Louise (80% чувствительности, 73% специфичности) в той же когорте пациентов [39].

Возможности ТА в диагностике миокардита в сочетании с острой или хронической сердечной недостаточностью были показаны в другом экспериментальном исследовании B. Baessler и соавт. [39]. В данном исследовании приводится превосходство ТА при идентификации миокардита по сравнению с применением общепринятых критериев Lake Louise: площадь под кривой AUC по критериям Lake Louise составила 0,51, по данным ТА при миокардите с острой и хронической сердечной недостаточностью – 0,76 и 0,85 соответственно. Для ТА в двух этих исследованиях были использованы данные T1- и T2-картирования, а в качестве эталонного стандарта использовалась эндомикардиальная биопсия.

Возможности радиомического подхода дифференцировать ИМ от миокардита на основе данных позднего контрастного усиления показаны в работе T. Di Noto и соавт., где было ретроспективно обработано 173 пациента (111 с ИМ и 62 с миокардитом) [40]. Для получения текстурных радиомических признаков использовался 2D и 3D TA, а также признаки формы и первого порядка. Были исследованы пять различных алгоритмов машинного обучения, проведена стратифицированная 10-кратная перекрестная валидация. Классификатор SVM (support vector machine) достиг наилучших результатов (точность 88%) для 2D признаков, а LDA (linear discriminant analysis) показал самую высокую точность (85%) для 3D признаков. По сравнению с субъективным визуальным анализом, проведенным исследователями с разным уровнем опыта, радиомический подход оказался эффективнее результатов менее опытного исследователя, но менее результативным, чем у врача с большим опытом. Так как в рутинной практике дифференциация миокардита и ИМ может быть затруднена при трансмуральном поражении, а также при наличии одновременно обеих патологий у одного пациента, применение ТА обладает неоспоримым преимуществом и является перспективной областью для дальнейшего изучения.

Текстурный анализ при кардиомиопатиях

На сегодняшний день МРТ сердца является золотым стандартом и наиболее информативным методом диагностики и последующего наблюдения за пациентами с кардиомиопатиями различного генеза [41]. У пациентов с гипертрофической кардиомиопатией (ГКМП) МР-визуализация обладает уникальным преимуществом выявления очагового фиброза миокарда по данным позднего контрастного усиления [42]. В последние годы публикуется все больше исследований, в которых ТА МРТ сердца применяется как инструмент для выявления миокардиальных фенотипических изменений у пациентов с ГКМП. Так, например, возможность дифференцировать пациентов с ГКМП и здоровых добровольцев была показана по данным радиомического анализа различных МР-последовательностей (T1-ВИ, T2-ВИ STIR, LGE, Cine) в работе Y. Amano и соавт. [43].

Возможность диагностики ГКМП, по данным радиомического анализа нативных T1-взвешенных изображений, продемонстрировали в своей работе B. Baessler и соавт., показав, что текстурные особенности T1-ВИ без применения контраста позволяют диагностировать ГКМП с высокой точностью, представляя потенциально новые параметры

для оценки изменений миокарда [25]. Кроме этого радиомический анализ позволяет дифференцировать различную этиологию гипертрофии ЛЖ (ГЛЖ) (ГКМП, ГЛЖ вследствие гипертонии, амилоидоз и аортальный стеноз) [44].

Перспективный на сегодняшний день подход к дифференциальной диагностике ГКМП, ДКМП и некомпактной кардиомиопатии продемонстрировали в своей работе С. Izquierdo и соавт. по данным радиомического анализа. [45]. U. Neisius и соавт. обнаружили, что радиомический анализ нативных последовательностей T1-картирования миокарда способен предсказать локализацию позднего контрастного усиления у пациентов с подозрением на ГКМП [46]. В данное исследование были включены 188 пациентов с установленным диагнозом ГКМП либо с подозрением на него, авторы продемонстрировали, что ТА нативных последовательностей T1-картирования представляет собой потенциальный инструмент принятия решения относительно диагноза ГКМП без введения контрастного препарата. Используемый авторами классификатор DTE (decision tree ensemble) смог идентифицировать всех пациентов с поздним контрастным усилением (LGE+) и 37% пациентов без контрастного усиления (LGE-). Авторы полагают, что представленную методику ТА можно использовать в качестве скринингового метода при направлении на МРТ сердца, т. к. согласно полученным результатам, введение гадолиния можно было избежать примерно у 1/3 пациентов из исследуемой группы. Кроме этого радиомический анализ последовательностей T1-картирования способен достаточно точно дифференцировать пациентов с ГКМП с различными мутациями генов саркомерных белков [47].

Таким образом, достаточно большое количество публикаций и убедительные результаты ТА МРТ сердца подтверждают потенциал радиомики в диагностике кардиомиопатий.

Текстурный анализ при ИМ

МР-исследование сердца с контрастным усилением – это неинвазивный, точный и хорошо воспроизводимый метод визуализации поражения миокарда, дающий представление о локальной и глобальной сократимости, наличии-отсутствии отека, наличии фиброза / рубцовой ткани при ИМ [48]. Возможности ТА для дифференциальной диагностики острого и хронического ИМ были показаны в исследовании A. Laggoza и соавт. [49]. При этом использование позднего контрастного усиления в качестве основы для радиомического анализа показало высокие значения чувствительности и специфичности ($Se = 0,81$; $Sp = 0,84$). Примечательно также, что с помощью ТА авторам удалось с высокой чувствительностью и специфичностью ($Se = 0,79$; $Sp = 0,80$) дифференцировать стадии ИМ на стандартных кино-последовательностях, на которых визуально поражение миокарда вследствие ИМ было не замечено в большинстве случаев.

В исследовании B. Chen и соавт. использовали ТА для извлечения радиомических признаков из нативных и постконтрастных последовательностей T1-картирования для выявления необратимых изменений миокарда после инфаркта. По сравнению со стандартным анализом T1-картирования ТА показал более высокие результаты прогнозирования неблагоприятного моделирования ЛЖ ($AUC = 0,91$) [50]. Кроме этого авторами была разработана модель, которая автоматически, с помощью методов глубокого обучения, определяет хронический ИМ по дан-

ным безконтрастных последовательностей ($AUC = 0,94$) [50]. Аналогичное исследование было проведено другой группой ученых и показало не менее высокие результаты у пациентов с риском аритмий, текстурные характеристики в данном случае оценивались в сочетании с данными фракции выброса ЛЖ ($Se \geq 90\%$; $Sp = 84\%$) [51].

Возможности ТА МРТ сердца с отсроченным контрастным усилением у пациентов с ИМ были продемонстрированы в работе K. Engan и соавт. В частности была найдена корреляция параметров ТА с риском развития аритмий. Практическую значимость результатов данного исследования авторы видят в улучшении отбора пациентов, которым необходима установка имплантируемого кардиовертера-дефибриллятора [52]. С помощью ТА также можно извлекать важную дополнительную информацию из нативных (неконтрастных) изображений. Такие данные имеют большое значение, когда невозможно использовать контрастные вещества (например, в случае почечной недостаточности). Возможности ТА нативных последовательностей T1-картирования были показаны в исследовании Q. Ma и соавт., в ходе которого авторы установили, что параметры радиомического анализа дают высокие результаты идентификации поражения ткани сердца при ИМ с подъемом сегмента ST ($AUC=0,88$ в обучающей выборке и $0,86$ в тестовой) [53]. Таким образом, радиомический анализ нативных изображений позволяет достаточно точно обнаружить ИМ и потенциально может быть использован в качестве альтернативы МРТ сердца с контрастным усилением.

Ограничения и перспективы метода

Воспроизводимость радиомического исследования является основной и самой важной проблемой, которая препятствует широкому внедрению ТА в клиническую практику. Так как радиомические признаки извлекаются последовательно в несколько этапов, воспроизводимость результатов, безусловно, зависит от каждого из них [54]. В случае МРТ воспроизводимость особенно важна из-за уникального процесса получения и формирования изображений, который включает в себя сотни изменяемых параметров, многие из которых влияют на получаемые изображения и могут привести к обнаружению ложных радиомических характеристик [28].

Для получения воспроизводимых данных можно применять несколько стратегий, таких как повторное тестирование, фантомные исследования, надежная сегментация и стандартизация [55]. Отсутствие стандартных протоколов для получения и анализа изображений является дополнительной проблемой успешного внедрения ТА в клиническую практику. Также должна учитываться обобщаемость – характеристика, определяемая тем, в какой мере результаты данного исследования применимы к другим группам больных, поскольку проверка на новом наборе данных является ключом к клиническому использованию радиомических моделей [56]. При разработке более надежных клинических инструментов необходимо проводить многоцентровые исследования.

Кроме этого существуют не зависящие от патофизиологии факторы, которые оказывают воздействие на получаемые МР-изображения и, следовательно, могут влиять на воспроизводимость ТА при МРТ сердца [22]. К ним относятся конкретная марка и тип сканера; напряженность магнитного поля; тип используемой импульсной последовательности; стратегия выборки в k-пространстве

Таблица. Перечень основных исследований в области радиомикки магнитно-резонансной томографии сердца
Table. List of the main studies in cardiac magnetic resonance radiomics

Авторы, год публикации Authors, year of publication	Вид исследования Type of the study	Выявляемая патология Detectable pathology	n	Напряженность магнитного поля, Тл Magnetic field strength, T	Используемая последовательность, Т MRI sequence	Применение контраста Contrast enhancement	Способ сегментации изображения Image segmentation method	Программное обеспечение Software	Основной вывод Main conclusion
Baessler B. et al., 2018	Ретроспективное Retrospective	Острый миокардит Acute myocarditis	39	1,5	T1, T2 mapping	Нет No	Ручной Manual	MaZda, version 4.6	ТА последовательностей T1-, T2-картирования показывает высокую чувствительность и специфичность для диагностики острого инфарктоподобного миокардита (Se 89%, Sp 92%). Texture analysis of T2 maps shows high sensitivity and specificity for the diagnosis of acute infarctlike myocarditis (Se 89%, Sp 92%)
Baessler B. et al., 2019	Ретроспективное Retrospective	Миокардит + острая/хроническая сердечная недостаточность Myocarditis + Acute / Chronic heart failure	71	1,5	T1, T2 mapping	Нет No	Ручной Manual	MaZda, version 4.7	Миокардит с симптомами острой сердечной недостаточности (AUC, 0.76; чувствительность, 81%; специфичность, 71%). Миокардит с симптомами хронической сердечной недостаточности (AUC, 0.85; чувствительность, 90%; специфичность, 72%). Acute heart failure-like myocarditis (AUC 0.76; Se 81% and Sp 71%). Chronic heart failure-like myocarditis (AUC 0.85; Se 90% and Sp 72%)
Di Noto T. et al., 2019	Ретро-спективное Retrospective	Миокардит / ИМ Myocarditis / MI	173	1,5; 3	LGE	Да Yes	Ручной Manual	PyRadiomics	Радиомические особенности LGE позволяют с высокой точностью отличить ИМ и миокардит Radiomics features of LGE permit the distinction between MI and myocarditis
Baessler B. et al., 2018	Ретро-спективное Retrospective	ГКМП HCM	62	1,5	T1-WI	Нет No	Ручной Manual	MaZda version 4.6	Текстурированный анализ неконтрастных T1-ВИ позволяет с высокой точностью обнаруживать изменения тканей миокарда при ГКМП и предоставляет потенциальные новые параметры для неконтрастной оценки изменений структуры миокарда Texture analysis on non-contrast T1-weighted images allows for the detection of myocardial tissue alterations in the setting of HCM with excellent accuracy, delivering potential novel parameters for a non-contrast assessment of myocardial texture alterations
Amano Y. et al., 2020	Ретро-спективное Retrospective	ГКМП HCM	31	1,5	T2-STIR, Cine, LGE	Да Yes	Ручной Manual	MaZda version 4.7	Текстурированный анализ T2-STIR является полезным количественным инструментом для обнаружения изменений тканей миокарда и может достоверно отражать неоднородность тканей миокарда при ГКМП Texture analysis is useful for quantitatively detecting myocardial tissue alterations, including abnormal hyperintensity, associated with HCM on T2-STIR
Alis D. et al., 2020	Ретро-спективное Retrospective	ГКМП HCM	64	1,5	LGE	Да Yes	Ручной Manual	QMaZda	Основанный на машинном обучении текстурный анализ LGE является перспективным инструментом для классификации пациентов с ГКМП с желудочковой тахикардией и без нее Machine learning-based texture analysis of LGE is a promising tool for the classification of hypertrophic cardiomyopathy patients with and without VT
Schofield R. et al., 2019	Ретро-спективное Retrospective	ГКМП, амилоидоз, ГБ + ГЛЖ, аортальный стеноз HCM, Amyloidosis, hypertonic disease + left ventricular hypertrophy, aortic stenosis	216	1,5	Cine	Нет No	Ручной Manual	TexRAD, TexRAD Ltd	Радиомические характеристики, полученные с использованием TA, показывают перспективные результаты в дифференциальной диагностике этиологии ГЛЖ Radiomic features of Cine-CMR data sets derived using texture analysis show promise in discriminating between the aetiologies of left ventricular hypertrophy
Amano Y. et al., 2018	Ретро-спективное Retrospective	ГКМП HCM	23	1,5; 3	LGE	Да Yes	Ручной Manual	MaZda 4.5	Пациенты с ГКМП и желудочковыми тахикардиями в анамнезе имели более интенсивное позднее включение контрастного препарата по данным TA Patients with hypertrophic cardiomyopathy and a history of ventricular tachyarrhythmias had a wider extension of LGE by texture analysis

Авторы, год публикации Authors, year of publication	Вид исследования Type of the study	Выявляемая патология Detectable pathology	n	Напряженность магнитного поля, Тл Magnetic field strength, T	Используемая последовательность, Т1 MRI sequence	Применение контраста Contrast enhancement	Способ сегментации изображения Image segmentation method	Программное обеспечение Software	Основной вывод Main conclusion
Izquierdo C., 2021	Ретроспективное Retrospective	ГКМП, ДКМП, некомпактный миокард HCM, DCM, non-compact myocardium	118	1,5	Cine	Нет No	Полуавтоматический Semi-automatic	PyRadiomics 3.0	Радиомические модели автоматизированной дифференциальной диагностики ГКМП, ДКМП и некомпактного миокарда показали высокие результаты (AUC 0,95) The use of radiomics models for the automated diagnosis of hypertrophic cardiomyopathy, dilated cardiomyopathy/left ventricular non-compaction resulted in excellent (AUC 0,95)
Neisius U., 2020	Ретроспективное Retrospective	ГКМП HCM	188	1,5	T1-mapping	Да Yes	Ручной Manual	MatLab	Радиомический анализ, примененный к последовательностям T1-картирования, позволяет дифференцировать пациентов с LGE+ и LGE-, тем самым определяя подгруппу, в которой можно избежать введения контрастных препаратов. Radiomic analysis of native T1-maps can identify LGE-, LGE+ patients for whom gadolinium administration can be safely avoided
Wang J., 2020	Ретроспективное Retrospective	ГКМП HCM	372	3	T1-mapping	Да Yes	Ручной Manual	MatLab	Радиомический анализ нативных последовательностей T1-картирования способен выявлять фенотипические различия между МУН7- и МУВРС3-ассоциированными подгруппами ГКМП Radiomic analysis of native T1 mapping images may be able to discriminate between MÜN7- and MÜVRS3-associated hypertrophic cardiomyopathy patients
Larrosa A., 2017	Ретроспективное Retrospective	ИМ MI	50	1,5	Cine; LGE	Да Yes	Ручной Manual	Matlab 2015b	ТА изображений в кино-режиме может выявлять различия между жизнеспособным и нежизнеспособным миокардом Texture analysis of cine-mode images can distinguish between nonviable, viable myocardium
Chen B., 2021	Перспективное Prospective	ИМ MI	70	3	T1-mapping	Да Yes	-	MaZda 4.6	ТА изображений, примененный к последовательностям T1-картирования до и после контрастирования, позволяет дифференцировать обратимые и необратимые изменения миокарда Texture analysis on quantitative extracellular volume fraction T1-mapping allows to differentiate between reversible and irreversible myocardial damage
Eftestol T., 2012	Перспективное Prospective	ИМ MI	51	1,5	LGE	Да Yes	Ручной Manual	MatLab	Текстуальный анализ LGE изображений позволяет дифференцировать пациентов с ИМ и показателями для установки имплантируемого кардиовертера-дефибриллятора LGE texture analysis allows to differentiate patients with MI and indications for implantable cardioverter-defibrillator
Engan K., 2010	Перспективное Prospective	ИМ MI	24	-	LGE	Да Yes	Ручной Manual	MatLab	Найдена корреляция параметров ТА с риском развития аритмий. ТА позволяет улучшить отбор пациентов, которым необходима установка имплантируемого кардиовертера-дефибриллятора A correlation of texture analysis parameters with the risk of developing arrhythmias was found. Texture analysis improves the selection of patients who need an implantable cardioverter-defibrillator
Ma Q., 2021	Перспективное Prospective	ИМ MI	68	3	T1-mapping	Да Yes	Автоматический Automatic	MaZda 4.6	Комбинация радиомического анализа неконтрастных последовательностей T1-картирования T1-BI обеспечивает более высокую диагностическую точность в оценке микрососудистой обструкции The combination of radiomics of non-contrast-enhanced T1 mapping and T1 values could provide higher diagnostic accuracy for microvascular obstruction

Примечание: ИМ – инфаркт миокарда, ГКМП – гипертрофическая кардиомиопатия, ГБ – гипертоническая болезнь, ГЛЖ – гипертрофия левого желудочка, ДКМП – дилатационная кардиомиопатия.

Note: MRI - magnetic resonance imaging, MI – myocardial infarction, HCM – hypertrophic cardiomyopathy, DCM – dilated cardiomyopathy, LVH – left ventricular hypertrophy, LGE – late gadolinium enhancement, T1-WI – T1 weighted image.

(например, декартова или радиальная выборка); пространственное разрешение (толщина среза, величина пиксела / воксела); отношение сигнал / шум; наличие артефактов (например, из-за нарушений ритма сердца, дыхания); настройки реконструкции изображения и др.

Результаты ТА зависят также от конкретного пакета программного обеспечения радиомики. На сегодняшний день существует большое количество пакетов программной реализации радиомического анализа цифровых изображений, как коммерческих (RADIOMICS™, TexRAD™), так и программ с открытым исходным кодом (LIFEx, IBEX, Pyradiomics, MaZda, 3d Slicer).

Доступные в настоящее время методы визуализации допускают широкие различия в протоколах получения и реконструкции изображений. Для визуальной или качественной оценки изображения это не является ограничением. Однако если речь идет о количественной оценке, различия в параметрах получения и реконструкции изображений могут привести к противоречивым результатам радиомического анализа, что также является одним из основных сдерживающих факторов развития радиомики на сегодняшний день [57, 58].

Радиомика, искусственный интеллект и машинное обучение имеют большой потенциал в рентгенологии в целом и в МРТ сердца в частности. На сегодняшний день, несмотря на некоторые успехи дифференциации сердечных заболеваний, радиологические исследования с использованием ТА сердца не полностью соответствуют стандартам, необходимым для внедрения их в клиническую практику. Кроме этого, большинство представленных на сегодняшний день исследований являются одноцентровыми и ретроспективными, наборы исследуемых данных в этих исследованиях относительно невелики.

Очевидно, что необходимы мультицентровые, в лучшем случае проспективные исследования, чтобы выработать единый алгоритм, протокол сбора данных с возможностью оценки информации с различных сканеров.

Заключение

Радиомический анализ данных МРТ сердца – это перспективная область исследований, успехи в которой могут внести колоссальный вклад в современную лучевую диагностику и кардиологию. Для принятия этой технологии профессиональным сообществом и включения в рекомендации результаты радиомического анализа должны быть подтверждены с использованием независимых наборов данных и предпочтительно с использованием данных различных лабораторий [37]. Кроме того, влияние показателей радиомики сердца на исходы заболеваний и / или результаты лечения должны быть доказаны в рандомизированных контролируемых исследованиях. Несмотря на то, что методы ТА в настоящее время недостаточно усовершенствованы, чтобы занять свое место в клинической практике, радиомика МРТ сердца имеет свои преимущества, а это, безусловно, дает возможность для потенциального развития [58].

Радиомика представляет собой многообещающий метод анализа изображений, который направлен на то, чтобы улучшить диагностику и прогноз заболеваний за счет извлечения большого числа количественных признаков, которые могут быть пропущены человеческим глазом при визуальном анализе изображений. Таким образом, биомаркеры радиомики, полученные путем извлечения данных из МР-изображений сердца, могут стать ценным инструментом для оценки жизнеспособности миокарда, поражения миокарда при миокардитах и кардиомиопатиях.

Литература / References

- Mayerhoefer M.E., Materka A., Langs G., Häggström I., Szczypiński P., Gibbs P. et al. Introduction to Radiomics. *J. Nucl. Med.* 2020;61(4):488–495. DOI: 10.2967/jnumed.118.222893.
- van Timmeren J.E., Cester D., Tanadini-Lang S., Alkadhi H., Baessler B. Radiomics in medical imaging: “how-to” guide and critical reflection. *Insights Imaging.* 2020;11(1):91. DOI: 10.1186/s13244-020-00887-2.
- Murray J.M., Kaissis G., Braren R., Kleesiek J. Wie funktioniert Radiomics? [A primer on radiomics]. *Radiologe.* 2020;60(1):32–41. (In German). DOI: 10.1007/s00117-019-00617-w.
- Avanzo M., Stancanella J., Pirrone G., Sartor G. Radiomics and deep learning in lung cancer. *Strahlenther Onkol.* 2020;196(10):879–887. DOI: 10.1007/s00066-020-01625-9.
- Огнерубов Н.А., Шатов А.В., Шатов И.А. Радиогеномика и радиомика в диагностике злокачественных опухолей: обзор литературы. *Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки.* 2017;22(6–2):1453–1460. [Ognerubov N.A., Shatov A.V., Shatov I.A. Radiogenomics and radiomics in the diagnostics of malignant tumours: a literary review. *Tambov University Reports. Series: Natural and Technical Sciences.* 2017;22(6–2):1453–1460. (In Russ.).] DOI: 10.20310/1810-0198-2017-22-6-1453-1460.
- Литвин А.А., Буркин Д.А., Кропинов А.А., Парамзин Ф.Н. Радиомика и анализ текстур цифровых изображений в онкологии (обзор). *Современные технологии в медицине.* 2021;13(2):97–106. [Litvin A.A., Burkin D.A., Kropinov A.A., Paramzin F.N. Radiomics and digital image texture analysis in oncology (review). *Modern Technologies in Medicine.* 2021;13(2):97–106. (In Russ.).] DOI: 10.17691/stm2021.13.2.11.
- Замятина К.А., Годзенко М.В., Кармазановский Г.Г., Ревивили А.Ш. Радиомика при заболеваниях печени и поджелудочной железы. Обзор литературы. *Анналы хирургической гепатологии.* 2022;27(1):40–47. [Zamyatina K.A., Godzenko M.V., Karmazanovsky G.G., Revishvili A.S. Radiomics in liver and pancreatic disorders: a review. *Annaly khirurgicheskoy gepatologii = Annals of HPB Surgery.* 2022;27(1):40–47. (In Russ.).] DOI: 10.16931/1995-5464.2022-1-40-47.
- Shur J.D., Doran S.J., Kumar S., Ap Dafydd D., Downey K., O'Connor J.P.B. et al. Radiomics in oncology: A practical guide. *Radiographics.* 2021;41(6):1717–1732. DOI: 10.1148/rgr.2021210037.
- Salvatore C., Castiglioni I., Cerasa A. Radiomics approach in the neurodegenerative brain. *Aging Clin. Exp. Res.* 2021;33(6):1709–1711. DOI: 10.1007/s40520-019-01299-z.
- Feng Q., Ding Z. MRI Radiomics classification and prediction in Alzheimer's disease and mild cognitive impairment: A review. *Curr. Alzheimer Res.* 2020;17(3):297–309. DOI: 10.2174/1567205017666200303105016.
- Pinamonti B., Picano E., Ferdeghini E.M., Lattanzi F., Slavich G., Landini L. et al. Quantitative texture analysis in two-dimensional echocardiography: application to the diagnosis of myocardial amyloidosis. *J. Am. Coll. Cardiol.* 1989;14(3):666–671. DOI: 10.1016/0735-1097(89)90108-3.
- Ferdeghini E.M., Pinamonti B., Picano E., Lattanzi F., Bussani R., Slavich G. et al. Quantitative texture analysis in echocardiography: application to the diagnosis of myocarditis. *J. Clin. Ultrasound.* 1991;19(5):263–270. DOI: 10.1002/jcu.1870190503.
- Lattanzi F., Bellotti P., Picano E., Chiarella F., Paterni M., Forni G. et al. Quantitative texture analysis in two-dimensional echocardiography: Application to the diagnosis of myocardial hemochromatosis. *Echocardiography.* 1996;13(1):9–20. DOI: 10.1111/j.1540-8175.1996.tb00863.x.
- Kagiyama N., Shrestha S., Cho J.S., Khalil M., Singh Y., Challa A. et al. A low-cost texture-based pipeline for predicting myocardial tissue remodeling and fibrosis using cardiac ultrasound. *EBioMedicine.* 2020;54:102726. DOI: 10.1016/j.ebiom.2020.102726.
- Amichi A., Laugier P. Quantitative texture analysis and transesophageal echocardiography to characterize the acute myocardial contusion. *Open Med. Inform. J.* 2009;3:13–18. DOI: 10.2174/1874431100903010013.
- Li L., Hu X., Tao X., Shi X., Zhou W., Hu H. Radiomic features of plaques derived from coronary CT angiography to identify hemodynamically significant coronary stenosis, using invasive FFR as the reference standard. *Eur. J. Radiol.* 2021;140:109769. DOI: 10.1016/j.ejrad.2021.109769.
- Shang J., Guo Y., Ma Y., Hou Y. Cardiac computed tomography radiomics: a narrative review of current status and future directions.

- Quant. Imaging Med. Surg. 2022;12(6):3436–3453. DOI: 10.21037/qims-21-1022.
18. Yunus M.M., Mohamed Yusof A.K., Ab Rahman M.Z., Koh X.J., Sabarudin A., Nohuddin P.N.E. et al. Automated classification of atherosclerotic radiomics features in coronary computed tomography angiography (CCTA). *Diagnostics (Basel)*. 2022;12(7):1660. DOI: 10.3390/diagnostics12071660.
19. Oikonomou E.K., Williams M.C., Kotanidis C.P., Desai M.Y., Marwan M., Antonopoulos A.S. et al. A novel machine learning-derived radiotranscriptomic signature of perivascular fat improves cardiac risk prediction using coronary CT angiography. *Eur. Heart J.* 2019;40(43):3529–3543. DOI: 10.1093/eurheartj/ehz592.
20. Hu G.Q., Ge Y.Q., Hu X.K., Wei W. Predicting coronary artery calcified plaques using perivascular fat CT radiomics features and clinical risk factors. *BMC Med. Imaging*. 2022;22(1):134. DOI: 10.1186/s12880-022-00858-7.
21. Попов Е.В., Анашбаев Ж.Ж., Мальцева А.Н., Сазонова С.И. Радиомические характеристики текстурных изменений эпикардиальной жировой ткани при атеросклеротическом поражении коронарных артерий. *Комплексные проблемы сердечно-сосудистых заболеваний*. 2021;10(4):6–16. [Popov E.V., Anashbaev Z.Z., Maltseva A.N., Sazonova S.I. Radiomic features of epicardial adipose tissue in coronary atherosclerosis. *Complex Issues of Cardiovascular Diseases*. 2021;10(4):6–16. (In Russ.)]. DOI: 10.17802/2306-1278-2021-10-4-6-16.
22. Leiner T. Radiomics in cardiac MRI: Sisyphus struggle or close to the summit of Olympus? *Radiol. Cardiothorac. Imaging*. 2020;25(2):e200244. DOI: 10.1148/ryct.2020200244.
23. Chang S., Han K., Suh Y.J., Choi B.W. Quality of science and reporting for radiomics in cardiac magnetic resonance imaging studies: a systematic review. *Eur. Radiol.* 2022;32(7):4361–4373. DOI: 10.1007/s00330-022-08587-9.
24. Jang J., Ngo L.H., Mancio J., Kucukseymen S., Rodriguez J., Pierce P. et al. Reproducibility of segmentation-based myocardial radiomic features with cardiac MRI. *Radiol. Cardiothorac. Imaging*. 2020;2(3):e190216. DOI: 10.1148/ryct.2020190216.
25. Baessler B., Mannil M., Maintz D., Alkadhi H., Manka R. Texture analysis and machine learning of noncontrast T1-weighted MR images in patients with hypertrophic cardiomyopathy-Preliminary results. *Eur. J. Radiol.* 2018;102:61–67. DOI: 10.1016/j.ejrad.2018.03.013.
26. Alis D., Guler A., Yergin M., Asmakutlu O. Assessment of ventricular tachyarrhythmia in patients with hypertrophic cardiomyopathy with machine learning-based texture analysis of late gadolinium enhancement cardiac MRI. *Diagn. Interv. Imaging*. 2020;101:137–146. DOI: 10.1016/j.diii.2019.10.005.
27. Baessler B., Luecke C., Lurz J., Klingel K., von Roeder M., de Waha S. et al. Cardiac MRI texture analysis of T1 and T2 maps in patients with infarctlike acute myocarditis. *Radiology*. 2018;289(2):357–365. DOI: 10.1148/radiol.2018180411.
28. Hassani C., Saremi F., Varghese B.A., Duddalwar V. Myocardial radiomics in cardiac MRI. *AJR Am. J. Roentgenol.* 2020;214(3):536–545. DOI: 10.2214/AJR.19.21986.
29. Koçak B., Durmaz E.Ş., Ateş E., Kılıçkesmez Ö. Radiomics with artificial intelligence: a practical guide for beginners. *Diagn. Interv. Radiol.* 2019;25(6):485–495. DOI: 10.5152/dir.2019.19321.
30. Buch K., Kuno H., Qureshi M.M., Li B., Sakai O. Quantitative variations in texture analysis features dependent on MRI scanning parameters: A phantom model. *J. Appl. Clin. Med. Phys.* 2018;19(6):253–264. DOI: 10.1002/acm2.12482.
31. Florez E., Fatemi A., Claudio P.P., Howard C.M. Emergence of radiomics: Novel methodology identifying imaging biomarkers of disease in diagnosis, response, and progression. *SM J. Clin. Med. Imaging*. 2018;4(1):1019.
32. Scapicchio C., Gabelloni M., Barucci A., Cioni D., Saba L., Neri E. A deep look into radiomics. *Radiol. Med.* 2021;126(10):1296–1311. DOI: 10.1007/s11547-021-01389-x.
33. Rizzo S., Botta F., Raimondi S., Origgi D., Fanciullo C., Morganti A.G. et al. Radiomics: the facts and the challenges of image analysis. *Eur. Radiol. Exp.* 2018;2:36. DOI: 10.1186/s41747-018-0068-z.
34. Aerts H., Velazquez E., Leijenaar R.T.H., Parmar C., Grossmann P., Carvalho S. et al. Decoding tumour phenotype by noninvasive imaging using a quantitative radiomics approach. *Nat. Commun.* 2014;5:4006. DOI: 10.1038/ncomms5006.
35. Parmar C., Grossmann P., Bussink J., Lambin P., Aerts H.J.W.L. Machine learning methods for quantitative radiomic biomarkers. *Sci. Rep.* 2015;5:13087. DOI: 10.1038/srep13087.
36. Jolliffe I. Principal component analysis. In: Encyclopedia of Statistics in Behavioral Science. Wiley StatsRef: Statistics Reference Online. 2005:501. DOI: 10.1002/0470013192.bsa501.
37. Rau A., Soschynski M., Taron J., Ruile P., Schlett C.L., Bamberg F. et al. Künstliche Intelligenz und Radiomics: Stellenwert in der kardialen MRT [Artificial intelligence and radiomics: Value in cardiac MRI]. *Radiologie (Heidelb.)*. 2022;62(11):947–953. (In German). DOI: 10.1007/s00117-022-01060-0.
38. Арутюнов Г.П., Палеев Ф.Н., Моисеева О.М., Драгунов Д.О., Соколова А.В., Арутюнов А.Г. и др. Миокардиты у взрослых. Клинические рекомендации 2020. *Российский кардиологический журнал*. 2021;26(11):4790. [Arutyunov G.P., Paleev F.N., Moiseeva O.M., Dragunov D.O., Sokolova A.V., Arutyunov A.G. et al. 2020 Clinical practice guidelines for Myocarditis in adults. *Russian Journal of Cardiology*. 2021;26(11):4790. (In Russ.)]. DOI: 10.15829/1560-4071-2021-4790.
39. Baessler B., Luecke C., Lurz J., Klingel K., Das A., von Roeder M. et al. Cardiac MRI and texture analysis of myocardial T1 and T2 maps in myocarditis with acute versus chronic symptoms of heart failure. *Radiology*. 2019;292(3):608–617. DOI: 10.1148/radiol.2019190101.
40. Di Noto T., von Spiczak J., Mannil M., Gantert E., Soda P., Manka R. et al. Radiomics for distinguishing myocardial infarction from myocarditis at late gadolinium enhancement at MRI: Comparison with subjective visual analysis. *Radiol. Cardiothorac. Imaging*. 2019;1(5):e180026. DOI: 10.1148/ryct.2019180026.
41. McDonagh T.A., Metra M., Adamo M., Gardner R.S., Baumbach A., Böhm M. et al. ESC Scientific Document Group. 2021 ESC Guidelines for the diagnosis and treatment of acute and chronic heart failure. *Eur. Heart J.* 2021;42(36):3599–3726. DOI: 10.1093/eurheartj/ehab368.
42. Belloni E., De Cobelli F., Esposito A., Mellone R., Perseghin G., Canu T. et al. MRI of cardiomyopathy. *AJR Am. J. Roentgenol.* 2008;191(6):1702–1710. DOI: 10.2214/AJR.07.3997.
43. Amano Y., Yanagisawa F., Omori Y., Suzuki Y., Ando C., Yamamoto H. et al. Detection of myocardial tissue alterations in hypertrophic cardiomyopathy using texture analysis of T2-weighted short inversion time inversion recovery magnetic resonance imaging. *J. Comput. Assist. Tomogr.* 2020;44(3):341–345. DOI: 10.1097/RCT.0000000000001007.
44. Schofield R., Ganeshan B., Fontana M., Nasis A., Castelletti S., Rosmini S. et al. Texture analysis of cardiovascular magnetic resonance cine images differentiates aetiologies of left ventricular hypertrophy. *Clin. Radiol.* 2019;74(2):140–149. DOI: 10.1016/j.crad.2018.09.016.
45. Izquierdo C., Casas G., Martín-Isla C., Campello V.M., Guala A., Gkontra P. et al. Radiomics-based classification of left ventricular non-compaction, hypertrophic cardiomyopathy, and dilated cardiomyopathy in cardiovascular magnetic resonance. *Front. Cardiovasc. Med.* 2021;8:764312. DOI: 10.3389/fcvm.2021.764312.
46. Neisius U., El-Rewaidy H., Kucukseymen S., Tsao C.W., Mancio J. et al. Texture signatures of native myocardial T1 as novel imaging markers for identification of hypertrophic cardiomyopathy patients without scar. *J. Magn. Reson. Imaging*. 2020;52(3):906–919. DOI: 10.1002/jmri.27048.
47. Wang J., Yang F., Liu W., Sun J., Han Y., Li D. et al. Radiomic analysis of native T1 mapping images discriminates between MYH7 and MYB-PC3-related hypertrophic cardiomyopathy. *J. Magn. Reson. Imaging*. 2020;52(6):1714–1721. DOI: 10.1002/jmri.27209.
48. Spadarella G., Perillo T., Ugga L., Cuocolo R. Radiomics in cardiovascular disease imaging: from pixels to the heart of the problem. *Curr. Cardiovasc. Imaging Rep.* 2022;15:11–21. DOI: 10.1007/s12410-022-09563-z.
49. Larroza A., López-Lereu M.P., Monmeneu J.V., Gavara J., Chorro F.J., Bodí V. et al. Texture analysis of cardiac cine magnetic resonance imaging to detect nonviable segments in patients with chronic myocardial infarction. *Med. Phys.* 2018;45(4):1471–1480. DOI: 10.1002/mp.12783.
50. Chen B., An D., He J., Wu C.-W., Yue T., Wu R. et al. Myocardial extracellular volume fraction radiomics analysis for differentiation of reversible versus irreversible myocardial damage and prediction of left ventricular adverse remodeling after ST-elevation myocardial infarction. *Eur. Radiol.* 2021;31:504–514. DOI: 10.1007/s00330-020-07117-9.
51. Eftestøl T., Woie L., Engan K., Kvaløy J.T., Nilsen D.W., Ørn S. Texture analysis to assess risk of serious arrhythmias after myocardial infarction. In: Computing in Cardiology IEEE. Krakow, Poland; 2012:365–368. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6420406> (06.07.2023).
52. Engan K., Eftestøl T., Orn S., Kvaloy J.T., Woie L. Exploratory data analysis of image texture and statistical features on myocardium and infarction areas in cardiac magnetic resonance images. *Annu. Int. Conf. IEEE Eng. Med. Biol. Soc.* 2010;2010:5728–5731. DOI: 10.1109/IEMBS.2010.5627866.
53. Ma Q., Ma Y., Yu T., Sun Z., Hou Y. Radiomics of non-contrast-enhanced T1 mapping: diagnostic and predictive performance for myocardial injury in acute ST-segment-elevation myocardial infarction. *Korean J. Radiol.* 2021;22(4):535–546. DOI:10.3348/kjr.2019.0969.
54. Raisi-Estabragh Z., Gkontra P., Jaggi A., Cooper J., Augusto J., Bhu-

- va A.N. et al. Repeatability of cardiac magnetic resonance radiomics: A multi-centre multi-vendor test-retest study. *Front. Cardiovasc. Med.* 2020;7:586236. DOI: 10.3389/fcvm.2020.586236.
55. Park J.E., Park S.Y., Kim H.J., Kim H.S. Reproducibility and generalizability in radiomics modeling: Possible strategies in radiologic and statistical perspectives. *Korean J. Radiol.* 2019;20(7):1124–1137. DOI: 10.3348/kjr.2018.0070.
56. Park S.H., Han K. Methodologic Guide for evaluating clinical performance and effect of artificial intelligence technology for medical diagnosis and prediction. *Radiology.* 2018;286(3):800–809. DOI: 10.1148/radiol.2017171920.
57. Varghese B.A., Cen S.Y., Hwang D.H., Duddalwar V.A. Texture analysis of imaging: What radiologists need to know. *AJR Am. J. Roentgenol.* 2019;212(3):520–528. DOI: 10.2214/AJR.18.20624.
58. Kumar V., Gu Y., Basu S., Berglund A., Eschrich S.A., Schabath M.B. et al. Radiomics: the process and the challenges. *Magn. Reson. Imaging.* 2012;30(9):1234–1248. DOI: 10.1016/j.mri.2012.06.010.
59. Amano Y., Suzuki Y., Yanagisawa F., Omori Y., Matsumoto N. Relationship between extension or texture features of late gadolinium enhancement and ventricular tachyarrhythmias in hypertrophic cardiomyopathy. *Biomed. Res. Int.* 2018;2018:4092469. DOI: 10.1155/2018/4092469.

Информация о вкладе авторов

Максимова А.С., Завадовский К.В. – концепция и дизайн исследования.

Максимова А.С., Усов В.Ю., Шелковникова Т.А., Мочула О.В., Рюмшина Н.И., Сухарева А.Е., Завадовский К.В. – сбор и обработка материала.

Максимова А.С., Завадовский К.В. – написание текста.

Максимова А.С., Усов В.Ю., Шелковникова Т.А., Мочула О.В., Рюмшина Н.И., Сухарева А.Е., Завадовский К.В. – редактирование.

Сведения об авторах

Максимова Александра Сергеевна, канд. мед. наук, научный сотрудник, отделение рентгеновских и томографических методов диагностики, Научно-исследовательский институт кардиологии, Томский национальный исследовательский медицинский центр Российской академии наук. ORCID 0000-0002-4871-3283.

E-mail: asmaximova@yandex.ru.

Усов Владимир Юрьевич, д-р мед. наук, профессор, ведущий научный сотрудник, отделение рентгеновских и томографических методов диагностики, Научно-исследовательский институт кардиологии, Томский национальный исследовательский медицинский центр Российской академии наук. ORCID 0000-0002-7352-6068.

E-mail: ussov1962@yandex.ru.

Шелковникова Татьяна Александровна, канд. мед. наук, старший научный сотрудник, отделение рентгеновских и томографических методов диагностики, Научно-исследовательский институт кардиологии, Томский национальный исследовательский медицинский центр Российской академии наук. ORCID 0000-0003-1367-5309.

E-mail: ffily@mail.ru.

Мочула Ольга Витальевна, канд. мед. наук, научный сотрудник, отделение рентгеновских и томографических методов диагностики, Научно-исследовательский институт кардиологии, Томский национальный исследовательский медицинский центр Российской академии наук. ORCID 0000-0002-7502-7502.

E-mail: mochula.olga@gmail.com.

Рюмшина Надежда Игоревна, канд. мед. наук, научный сотрудник, отделение рентгеновских и томографических методов диагностики, Научно-исследовательский институт кардиологии, Томский национальный исследовательский медицинский центр Российской академии наук. ORCID 0000-0002-6158-026X.


E-mail: n.rumshina@list.ru.

Сухарева Анна Евгеньевна, канд. мед. наук, научный сотрудник, отделение рентгеновских и томографических методов диагностики, Научно-исследовательский институт кардиологии, Томский национальный исследовательский медицинский центр Российской академии наук. ORCID 0000-0003-4807-3762.

E-mail: doctor-anyuta@mail.ru.

Завадовский Константин Валерьевич, д-р мед. наук, заведующий отделом лучевой диагностики, Научно-исследовательский институт кардиологии, Томский национальный исследовательский медицинский центр Российской академии наук. ORCID 0000-0002-1513-8614.

E-mail: konstz@cardio-tomsk.ru.

 **Максимова Александра Сергеевна**, e-mail: asmaximova@yandex.ru.

Information on author contributions

Maksimova A.S., Zavadovsky K.V. – study concept and design.

Maksimova A.S., Ussov W.Yu., Shelkovnikova T.A., Mochula O.V., Rymshina N.I., Sykhareva A.E., Zavadovsky K.V. – material collection and processing.

Maksimova A.S., Zavadovsky K.V. – writing the text.

Maksimova A.S., Ussov W.Yu., Shelkovnikova T.A., Mochula O.V., Rymshina N.I., Sykhareva A.E., Zavadovsky K.V. – editing.

Information about the authors

Aleksandra S. Maksimova, M.D., Cand. Sci. (Med.), Research Scientist, Department of Radiology and Tomography, Cardiology Research Institute, Tomsk National Research Medical Center, Russian Academy of Sciences, Tomsk, Russia. ORCID 0000-0002-4871-3283.

E-mail: asmaximova@yandex.ru.

Wladimir Yu. Ussov, Dr. Sci. (Med.), Leading Research Scientist, Department of Radiology and Tomography, Cardiology Research Institute, Tomsk National Research Medical Center, Russian Academy of Sciences, Tomsk, Russia. ORCID 0000-0002-7352-6068.

Email: ussov1962@yandex.ru.

Tatyana A. Shelkovnikova, M.D., Cand. Sci. (Med.), Senior Research Scientist, Department of Radiology and Tomography, Cardiology Research Institute, Tomsk National Research Medical Center, Russian Academy of Sciences, Tomsk, Russia. ORCID 0000-0003-1367-5309.

E-mail: ffily@mail.ru.

Olga V. Mochula, M.D., Cand. Sci. (Med.), Research Scientist, Department of Radiology and Tomography, Cardiology Research Institute, Tomsk National Research Medical Center, Russian Academy of Sciences, Tomsk, Russia. ORCID 0000-0002-7502-7502.

E-mail: mochula.olga@gmail.com.

Nadezhda I. Rymshina, M.D., Cand. Sci. (Med.), Research Scientist, Department of Radiology and Tomography, Cardiology Research Institute, Tomsk National Research Medical Center, Russian Academy of Sciences, Tomsk, Russia. ORCID 0000-0002-6158-026X.


E-mail: n.rumshina@list.ru.

Anna E. Sykhareva, M.D., Cand. Sci. (Med.), Junior Research Scientist, Department of Radiology and Tomography, Cardiology Research Institute, Tomsk National Research Medical Center, Russian Academy of Sciences, Tomsk, Russia. ORCID 0000-0003-4807-3762.

E-mail: doctor-anyuta@mail.ru.

Konstantin V. Zavadovsky, Dr. Sci. (Med.), Head of the Department of Radiation Diagnostics, Cardiology Research Institute, Tomsk National Research Medical Center, Russian Academy of Sciences, Tomsk, Russia. ORCID 0000-0002-1513-8614.

E-mail: konstz@cardio-tomsk.ru.

 **Aleksandra S. Maksimova**, e-mail: asmaximova@yandex.ru.

Received June 01, 2023

Поступила 01.06.2023