

ЛЕКЦИИ И ОБЗОРЫ / LECTURES AND REVIEWS

УДК 616.1

<http://dx.doi.org/10.22328/2079-5343-2022-13-2-7-15>**РАДИОМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ИЗОБРАЖЕНИЙ В КАРДИОЛОГИИ: ВОЗМОЖНОСТИ И ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ: ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ***Е. В. Попов^{✉*}, Н. Г. Кривоногов[✉], С. А. Округин[✉], С. И. Сазонова[✉]*

Научно-исследовательский институт кардиологии, Томск, Россия

Большинство современных биомедицинских исследований направлены на персонализацию диагностики и лечения различных заболеваний. Реализовать индивидуальный подход можно, используя радиомикру — новейшее направление лучевой диагностики, связанное с извлечением большого количества (от сотен до нескольких тысяч) дополнительных количественных показателей из медицинских изображений, путем использования специализированного программного обеспечения. Метод активно используется в онкологии для выявления радио-химиорезистентных зон опухоли, а также неинвазивного определения фенотипа и генотипа новообразования. В то же время перспективы применения и клиническая значимость данного подхода в кардиологии до сих пор не определены и являются предметом активного исследования в последние годы. В связи с этим целью представленного обзора явился сбор информации из доступных баз данных и оценка степени изученности проблемы радиомического анализа изображений сердца при использовании различных лучевых модальностей, а также определение перспектив использования указанного подхода в клинической практике.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: радиомика, компьютерная томография, магнитно-резонансная томография, однофотонно-эмиссионная компьютерная томография, ишемическая болезнь сердца

*Для корреспонденции: Попов Евгений Викторович, popov-evgeniy92@mail.com

Для цитирования: Попов Е.В., Кривоногов Н.Г., Округин С.А., Сазонова С.И. Радиомический анализ изображений в кардиологии: возможности перспективы применения: обзор литературы // *Лучевая диагностика и терапия*. 2022. Т. 13, № 2. С. 7–15. DOI: <http://dx.doi.org/10.22328/2079-5343-2022-13-2-7-15>.

A REVIEW OF RADIOMIC IMAGE ANALYSIS IN CARDIOLOGY: POSSIBILITIES AND PROSPECTS OF APPLICATION: A REVIEW*Evgeniy V. Popov^{✉*}, Nikolay G. Krivonogov[✉], Sergey A. Okrugin[✉], Svetlana I. Sazonova[✉]*

Cardiology Research Institute, Tomsk, Russia

The majority of modern biomedical research is aimed at personifying the diagnosis and treatment of various diseases. An individual approach can be implemented using radiomics — the latest radiation diagnostics associated with the extraction of a large number (from hundreds to several thousand) of additional quantitative indicators from medical images using specialized software. The method is actively used in oncology to identify radiochemoresistant tumor zones, as well as non-invasive determination of the phenotype and genotype of the neoplasm. At the same time, the prospects for the application and clinical significance of this approach in cardiology have not yet been determined and have been the subject of active research in recent years. In this regard, the purpose of this review was to collect information from available databases and assess the degree of knowledge of the problem of radiomic analysis of heart images using various radiation modalities, as well as to determine the prospects for using this approach in clinical practice.

KEYWORDS: radiomic, computed tomography, magnetic resonance imaging, single proton emission computed tomography, coronary artery disease

*For correspondence: Evgeniy V. Popov, popov-evgeniy92@mail.com

For citation: Popov E.V., Krivonogov N.G., Okrugin S.A., Sazonova S.I. Radiomic image analysis in cardiology: possibilities and prospects of application: a review // *Diagnostic radiology and radiotherapy*. 2022. Vol. 13, No. 2. P. 7–15. DOI: <http://dx.doi.org/10.22328/2079-5343-2022-13-2-7-15>.

Введение. Большинство современных биомедицинских исследований направлены на персонализацию диагностики и лечения различных заболеваний [1–5]. Реализовать индивидуальный подход можно, используя радиомикю — новейшее направление лучевой диагностики, связанное с извлечением большого количества (от сотен до нескольких тысяч) дополнительных количественных показателей из медицинских изображений путем использования специализированного программного обеспечения [3–7]. Это достигается путем применения специального программного обеспечения, которое позволяет оценивать пространственное распределение цветовых оттенков на изображении, что в свою очередь отражает текстуру ткани.

Процесс применения радиомического анализа можно разделить на несколько этапов (рис. 1). Первый этап — выбор области интереса ROI (англ.: ROI — region of interest) на изображении и последующая работа с ней. Сегментация может быть выполнена:

1) вручную, когда пользователь самостоятельно выбирает группы вокселей, относящиеся к интере-

ного обеспечения и способов вычисления количество получаемых радиомических показателей сильно варьирует [8]. Второй этап — извлечение радиомических показателей. Для уменьшения количества этих характеристик в процессе статистической обработки получаемых результатов применяют кластерный анализ и метод главных компонент [3, 6, 7].

Третий этап — статистический анализ, соответствующий цели исследования.

Четвертый этап — построение и проверка prognostic модели, включающей отобранные радиомические характеристики. Для этого используют методы «дерево принятия решений», линейную регрессию, логистическую регрессию и др. [3, 5–7, 9].

Предполагается, что радиомические показатели имеют патофизиологический и патоморфологический смысл, отражают текстуру ткани, ее неоднородность, форму (геометрические особенности) и жесткость, в связи с чем могут быть использованы для решения клинических и фундаментальных медицинских задач [4–7].

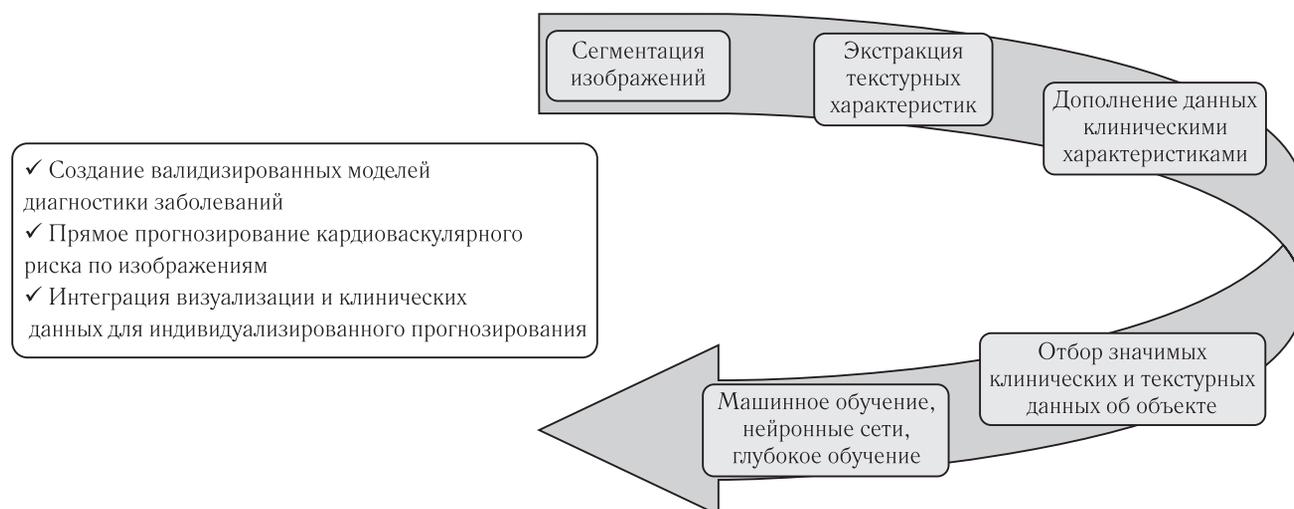


Рис. 1. Процесс радиомического анализа (схема предложена авторами)
Fig. 1. The process of radiomic analysis (scheme proposed by the authors)

сующей его биологической структуре и выставляет их границы;

2) полуавтоматически, когда пользователь проводит сегментацию самостоятельно, но с применением средств автоматизации сегментации;

3) автоматически, когда программа самостоятельно выделяет необходимый элемент изображения и выдает карту сегментации.

После выбора области интереса в программной обеспечении можно настроить процесс радиомического анализа, единого мнения по поводу выбора параметров радиомического анализа нет, и от исследования к исследованию в зависимости от программ-

В настоящей статье мы приведем краткое описание основных радиомических характеристик и их групп [4, 6, 7].

Показатели статистики первого порядка характеризуют распределение интенсивности серого цвета, форму и размер интересующей области [4, 6, 7].

Показатели второго порядка включают:

1) *матрицу совместного появления серого цвета (GLCM)*, отображающую различные комбинации дискретных интенсивностей (уровней серого цвета) соседних вокселей вдоль одного из векторов, обозначенных программным обеспечением на изображении [4, 6, 7];

2) *матрицу длин серий серого цвета (GLRLM)*, которая характеризует длину последовательности вокселей с одинаковым уровнем серого цвета [4, 6, 7];

3) *матрица размеров зон различных уровней серого цвета (GLSZM)* — отражает количество групп вокселей с идентичным уровнем серого цвета, в которые входят один центральный воксель и связанные с ним 26 соседних [4, 6, 7];

4) *матрица расстояний зон одинакового уровня серого цвета (GLDM)* — отражает количество групп (или зон) вокселей, имеющих одинаковую интенсивность серого цвета и расположенных на одинаковом расстоянии до края области интереса. Таким образом, GLDM демонстрирует связь между уровнем серого цвета и его местоположением [4, 6, 7];

5) *матрица различий соседних оттенков серого цвета (NGLDM)* — отражает взаимоотношение серого цвета в заданном объеме. Это достигается путем количественной оценки разницы между средними значениями интенсивности серого цвета в соседних вокселях, расположенных на заданном расстоянии [4, 6, 7].

Радиомика в анализе изображений сердца.

Первые работы в области радиомики были начаты в конце 90-х годов прошлого века и заключались в текстурном анализе планарных изображений (фотографий, рентгенограмм) [8]. В дальнейшем метод радиомической оценки был применен и для томографических исследований с целью выявления радио-химиорезистентных зон опухоли, а также неинвазивного определения фенотипа и генотипа новообразования [4–8]. На сегодняшний день показано, что в онкологии радиомический анализ упрощает и ускоряет диагностический процесс, способствуя оптимизации выбора способа лечения [3, 4, 8, 10–12]. Перспективы применения и клиническая значимость данного подхода в кардиологии до сих пор не определены и являются предметом активного исследования в последние годы [7, 13].

В частности, радиомический анализ рассматривается как перспективный подход для выявления нестабильных атеросклеротических бляшек (АСБ) в коронарных артериях, которые на современном этапе можно диагностировать, используя внутрисудистый ультразвуковое исследование (всУЗИ), оптическую когерентную томографию (ОКТ) либо позитронно-эмиссионную томографию (ПЭТ) с NaF-18 [14, 15]. Данные методы являются дорогостоящими и пока доступны лишь в высокотехнологичных специализированных кардиологических клиниках [14, 15]. Мультиспиральная компьютерная коронароангиография (КТ-КАГ) более распространена, обладает высокой воспроизводимостью и точностью, позволяет одновременно обследовать все коронарное русло, оценивать степень стеноза и размерные характеристики АСБ [16, 17]. В ряде исследований было показано, что некоторые КТ-призна-

ки, характеризующие АСБ, сопряжены с высоким риском возникновения острого инфаркта миокарда. К ним относятся положительное ремоделирование, низкая рентгеновская плотность бляшки (<30 HU), кольцевидное усиление плотности по периферии бляшки, наличие микрокальцинатов (менее 3 мм) в мягкотканном компоненте [16, 17] и неровность контура АСБ. В нескольких исследованиях указанные КТ-признаки, в том числе и их сочетания, были сопоставлены с данными всУЗИ и ОКТ, но результаты этих исследований оказались противоречивыми, и диагностическая эффективность КТ-КАГ в оценке нестабильности атеросклеротических бляшек на сегодняшний день точно не установлена [16]. С целью повышения точности метода для выявления признаков нестабильности АСБ М. Kolossváry и соавт. в 2019 г. предложили использовать радиомический анализ изображений КТ-КАГ [18–21]. Полученный результат верифицировали данными всУЗИ, ОТК и ПЭТ с NaF-18. Авторами было показано, что КТ-радиомические характеристики АСБ превосходят обычные КТ-признаки нестабильности бляшек при верификации всУЗИ (AUC=0,72; ДИ (0,65–0,78) против AUC=0,59; ДИ (0,57–0,62); $p<0,001$), ОТК (AUC=0,8; ДИ (0,72–0,88) против AUC=0,66; ДИ (0,58–0,73); $p<0,001$) и ПЭТ с NaF-18 (AUC=0,87; ДИ (0,82–0,91) против AUC=0,65; ДИ (0,64–0,66); $p<0,001$). Данные проведенного исследования указывают на потенциал применения КТ-радиомики для диагностики АСБ высокого риска в коронарных артериях [18–20].

В последние годы активно исследуется возможность использования морфометрических показателей эпикардального жира, определяемого различными визуализирующими методами, такими как эхокардиография, компьютерная томография (рис. 2) [22–26], в качестве маркеров прогрессирования атеросклероза КА и предикторов неблагоприятных ССС [24, 25, 27].

Основанием для этого послужили многочисленные работы, в которых было показано, что эпикардальная жировая ткань (ЭЖТ) является сложным эндокринным органом, продуцирующим целый ряд биологически активных веществ — адипокинов, способных диффундировать в слой интима-медиа близлежащего сосуда, влияя на его вазомоторную функцию и приводя к воспалительному ответу [23–25, 27, 28]. Учитывая тесную анатомическую близость ЭЖТ к коронарным артериям, было высказано предположение, что местное воспаление способствует образованию и росту мягкотканых (не кальцинированных) АСБ и последующим неблагоприятным клиническим событиям [23–25, 27, 28]. Однако в нескольких исследованиях было показано, что ни плотность, ни толщина, ни объем общего ЭЖТ не имеют самостоятельного значения в прогнозе прогрессирования атеросклероза КА [23–25, 27, 28].

В настоящее время установлено, что в стенке КА и периваскулярной жировой ткани (ПЖТ) реализуются клеточно-молекулярные взаимодействия [27–29]. В частности, наличие воспаления в стенке сосуда приводит к высвобождению провоспалительных молекул, накоплению липидов и формированию

($AUC=0,77$; чувствительность 95% ДИ 0,622–0,926) ($p<0,001$) [30, 31]. Кроме того, Е.К. Ойкопотоу и соавт. (2019, 2020) продемонстрировали достоверные отличия радиомических характеристик ПЖТ пациентов, перенесших острый инфаркт миокарда (ИМ) от таковых в контрольной

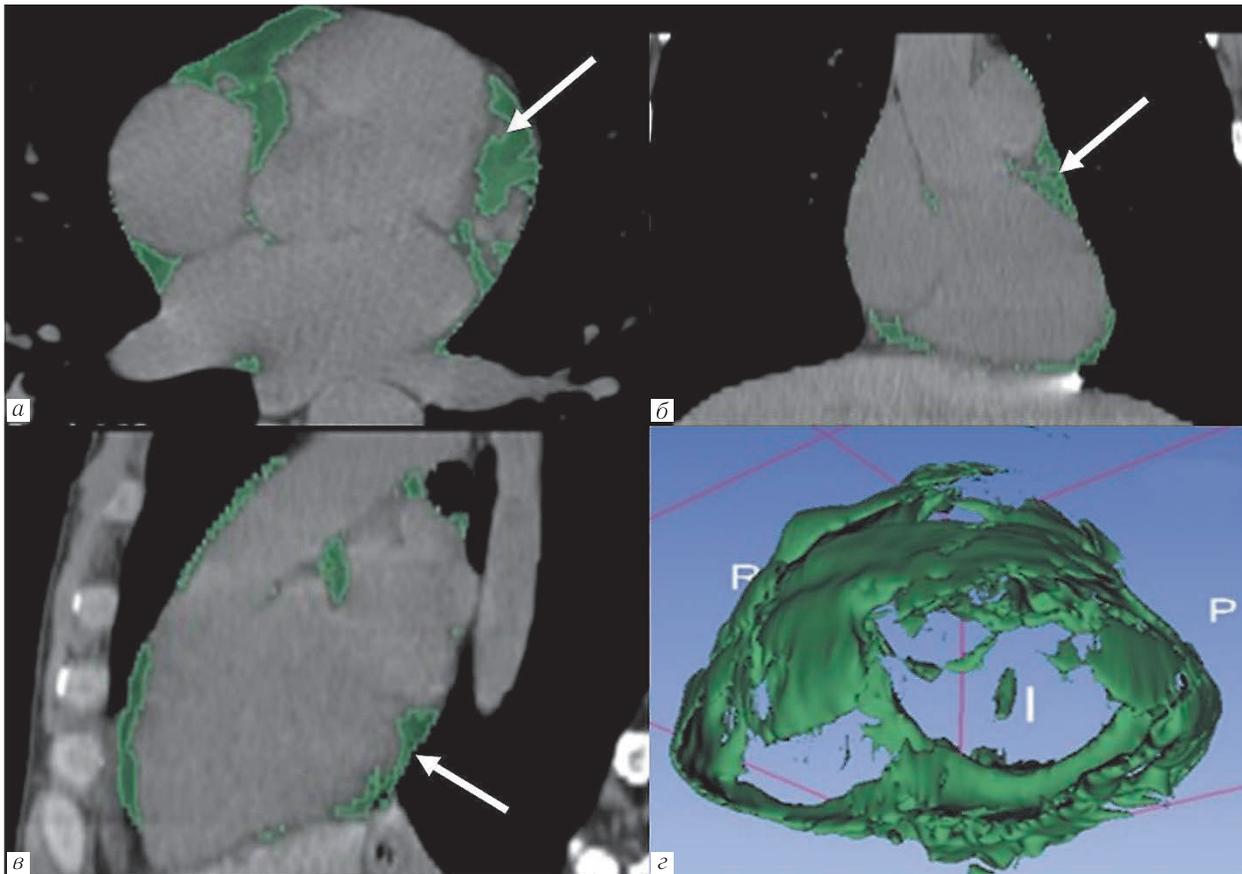


Рис. 2. Сегментация эпикардиальной жировой ткани на серии КТ-изображениях сердца, выполненная в программе 3D-slicer: *а* — аксиальный срез; *б* — корональный срез; *в* — сагиттальный срез; *г* — 3D-модель эпикардиальной жировой ткани. Белыми стрелками указана сегментированная эпикардиальная жировая ткань (рисунки из собственного архива)

Fig. 2. Segmentation of epicardial adipose tissue on a series of CT images of the heart, performed in the 3D-slicer program. *a* — axial section; *б* — coronal section; *в* — sagittal section; *г* — 3D model of epicardial adipose tissue. White arrows indicate segmented epicardial adipose tissue (drawings from our own archive)

атеросклеротической бляшки [27–29]. В свою очередь, данные изменения, связаны со структурными особенностями ПЖТ [27–31] такими как участки фиброза, неоангиогенез и, предположительно, могут быть выявлены с помощью радиомического анализа [30, 31]. Сегментация ПЖТ более сложная, для получения точных результатов необходимо использовать автоматические способы сегментации [30, 31], однако сегментация полуавтоматическим или ручным методом также возможна, но это может понизить воспроизводимость полученных результатов. Пример ручной сегментации, выполненной в программе 3D-Slicer, представлен на рис. 3.

В ряде исследований было показано, что радиомические показатели сопряжены с фиброзными изменениям, неоангиогенезом ($AUC=0,774$; 95% ДИ 0,622–0,926) и воспалением в ПЖТ

группе ($AUC=0,77$ [95% ДИ 0,62–0,93]). На основании полученных результатов был предложено использовать показатель FRP (fat radiomic profile), который отображает радиомические особенности жировой ткани. Последующий анализ показал, что прогностическая модель неблагоприятных сердечно-сосудистых событий (ССС), использующая радиомический показатель радиомический профиль жира (FRP), превосходила по точности традиционные модели стратификации риска, включающие клинические факторы, индекс коронарного кальция, степень стенозирования КА и наличие признаков нестабильности АСБ ($AUC=0,126$; $p<0,001$). В предыдущих работах Е.К. Ойкопотоу и соавт. использовали КТ-показатель fat attenuation index (FAI), основанного на измерении средней плотности жировой ткани и этот показатель оказался менее

чувствителен, так как FRP оставался неизменным через 6 месяцев после ИМ. Это указывает на то, что FRP обнаруживает стойкие изменения ПЖТ, не фиксируемые FAI [28, 30, 31].

сти (86,2%) радиомических показателей для дифференциальной диагностики гипертрофической кардиомиопатии и гипертрофии миокарда у больных с АГ (AUC=0,820; ДИ 0,769–0,903) [33, 38]. В исследова-

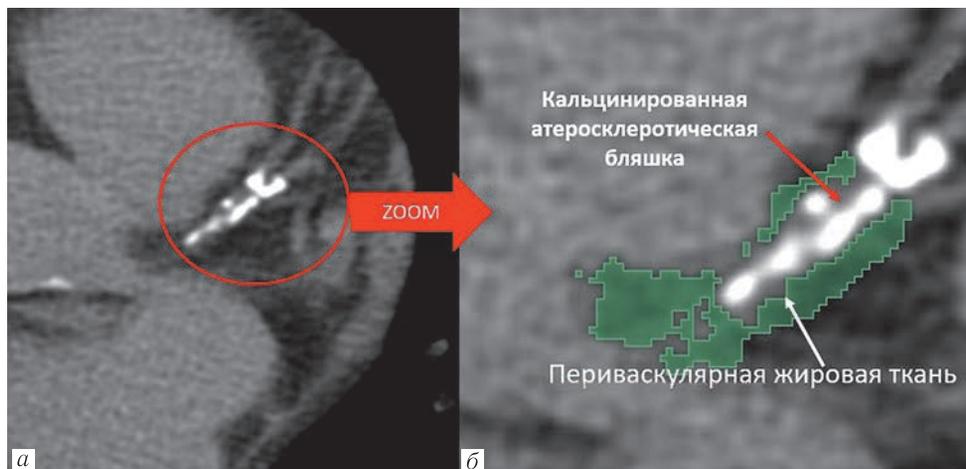


Рис. 3. Сегментация периваскулярной жировой ткани вокруг переднениходящей артерии с атеросклеротическим поражением, выполненная в программе 3D-Sliser: *а* — нативное КТ-изображение сердца с атеросклеротическим поражением переднениходящей артерии (красный круг); *б* — увеличенное изображение и результат сегментации периваскулярной жировой ткани (собственные рисунки)

Fig. 3. Segmentation of the perivascular adipose tissue around the anterior descending artery with an atherosclerotic lesion, performed in the 3D-Sliser program. *a* — Native CT image of the heart with an atherosclerotic lesion of the anterior descending artery (red circle); *b* — is an enlarged image and the result of segmentation of perivascular adipose tissue (own drawings)

Другим высокоточным и высокоинформативным методом визуализации патологии сердечно-сосудистой системы является магнитно-резонансная томография (МРТ). Несомненным преимуществом метода является отсутствие лучевой нагрузки на пациента при обследовании. В то же время, в ряде случаев интерпретация изображений может быть затруднена из-за отсутствия количественной шкалы градаций серого цвета, отражающей интенсивность МР-сигнала [32, 33]. Например, по этой причине сложно определить этиологию гипертрофии сердечной мышцы, используя лишь МРТ-обследование [33–35]. По этой причине для повышения точности метода с 2018 г. предпринимаются попытки использования радиомического анализа МР-изображений, полученных без контрастного усиления, у больных с артериальной гипертензией (АГ) и гипертрофической кардиомиопатией (ГКМП) [33, 36]. Для этого разработаны способы сегментации миокарда ЛЖ в различных программах [37], сегментация основана на значениях интенсивности МР-сигнала, тканей, может выполняться на T1- и T2-взвешенных изображениях (рис. 4).

Так, в исследовании Vaessler и соавт. (2018) было установлено, что радиомические характеристики миокарда, в частности, показатель GLevNonU, различаются у здоровых лиц и пациентов с гипертрофией сердечной мышцы на фоне АГ (чувствительность 91%, специфичность 93%; AUC=0,95) ($p < 0,001$) [33, 34]. Позднее в работе Neisus и соавт. (2019) были получены высокие показатели диагностической точно-

сти Cetine и соавт. [33] при выполнении радиомического анализа также были продемонстрированы различия между группами больных с АГ, сахарным диабетом (СД) и здоровыми добровольцами (значения AUC для больных СД 0,80; для больных гипертензией 0,72) [33, 36].

Еще одним направлением использования радиомики в кардиологии является дифференцирование

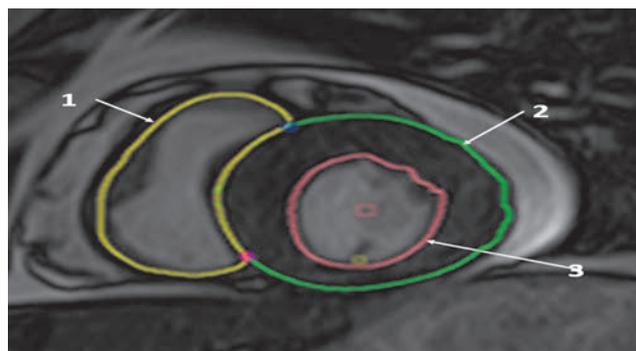


Рис. 4. Сегментация миокарда, выполненная в программе CVI42 (T1-взвешенное МР-изображение короткой оси сердца): 1 — границы правого желудочка; 2 — внешние границы левого желудочка; 3 — внутренние границы левого желудочка, полость левого желудочка (собственные рисунки)

Fig. 4. Myocardial segmentation performed in the CVI42 program (T1-weighted MR image of the short axis of the heart): 1 — borders of the right ventricle; 2 — external borders of a left ventricle; 3 — internal borders of the left ventricle, the cavity of the left ventricle (own drawings)

рубцовых и жизнеспособных зон миокарда. В рутинной клинической практике данные изменения можно диагностировать, применяя МРТ в сочетании со стресс-тестированием и внутривенным введением контрастных средств [32], что накладывает определенные ограничения на широкое применение метода. Предполагается, что радиомический анализ может позволить разграничить жизнеспособный и нежизнеспособный миокард на бесконтрастных МРТ-изображениях сердца. Эта гипотеза подтверждается несколькими исследованиями последних лет [33, 35]. В частности, в работе В. Н. Chen и соавт. (2020) радиомика позволила дифференцировать рубцовые изменения и гибернированный миокард при МРТ обследовании без контрастного усиления с чувствительностью 72% [33, 35]. Полученные данные были верифицированы последующей оценкой отсроченного контрастирования на изображениях [28, 32, 33, 39–42]. В исследованиях ряда других авторов показатели чувствительности и специфичности радиомического анализа бесконтрастных кино-МРТ изображениях варьировали от 82 до 92% [28, 33, 40, 42].

Новым направлением применения МРТ сердца является оценка гетерогенности периинфарктной области с целью выявления потенциально аритмогенных участков, содержащих смешанные зоны жизнеспособного миокарда и фиброза [32, 33]. С клинической точки зрения это важно у пациентов, перенесших острый инфаркт миокарда и являющихся кандидатами на имплантацию кардиовертера-дефибриллятора для первичной профилактики внезапной сердечно-сосудистой смерти. Предполагается, что радиомика МРТ изображений позволит выявить диагностические критерии, позволяющие оптимизировать отбор пациентов на имплантацию устройства. В последние годы в этом направлении выполнено несколько исследований и было показано, что радиомические характеристики имеют значимую прогностическую ценность лишь в сочетании с другими клинико-инструментальными данными. Так, Kotu и соавт. при построении прогностической модели для оценки риска развития жизнеугрожающих аритмий у больных, перенесших острый ИМ, использовали показатели радиомической оценки LGE-изображений миокарда, размера рубца и фракции выброса ЛЖ и получили значение диагностической точности 94,44% (AUC=0,97) [32]. В то же время изолированное применение радиомических критериев привело к уменьшению чувствительности и специфичности прогностической модели до 75% и 83,3% соответственно [32]. Аналогичные результаты были получены Eftestøl и соавт. [32]. В частности, авторами было продемонстрировано повышение прогностической ценности радиомики при ее сочетании с показателем ФВ ЛЖ [32].

Согласно современным представлениям, МРТ является основным методом неинвазивной диагностики острого миокардита [32, 39]. Для этого используются критерии Lake Louise, показатели диагности-

ческой эффективности которых, однако, варьируют в различных исследованиях [32]. В связи с этим предпринимаются отдельные попытки увеличения точности МРТ для выявления острого воспаления сердечной мышцы путем радиомического анализа LGE-изображений. Так, в работе Baessler и соавт. было показано, что применение радиомики дополнительно к стандартному подходу позволяет повысить чувствительность и специфичность Lake Louise критериев до 100% и 96% соответственно [32, 43].

Одним из новых направлений применения радиомики является текстурный анализ сцинтиграфических изображений сердца. При этом большинство исследований, выполненных в данном направлении, относятся к экспериментальным или фантомным [44]. Это обусловлено тем, что для однофотонной эмиссионной компьютерной томографии (ОФЭКТ) характерна высокая вариация параметров получения изображений, включая сбор данных, тип сканирующего оборудования, подготовка пациентов и пр.

В клинической практике наиболее широко используется перфузионная сцинтиграфия миокарда (ПСМ), являющаяся важным методом диагностики ИБС. Протокол обследования больного включает внутривенное введение кардиотропного радиофармпрепарата, например ^{99m}Tc -МИБИ (метил-изобутил изонитрила), и последующую регистрацию распределения радиоактивности в сердце при помощи ОФЭКТ. Основа для анализа получаемых изображений — полуколичественный метод оценки нарушений перфузии и визуальная оценка изображений. Недостатком ПСМ является низкая разрешающая способность. Использование радиомики позволяет улучшить диагностические и прогностические результаты ПСМ за счет предоставления радио-биомаркеров, коррелирующих с гетерогенностью перфузии [44–46]. В нескольких исследованиях было установлено, что наиболее значимыми радиомическими признаками на сцинтиграммах миокарда являются асимметрия интенсивности и оттенок кластера GLCM для правой коронарной артерии (ПКА) [44], а также интенсивность 90-го перцентиля гистограммы для левой огибающей артерии (ОА) [44–46].

Помимо ПСМ в ядерной кардиологии достаточно широко применяется ОЭКТ с радиофармпрепаратом ^{123}I -MIBG (метайодбензил-гуанидин). Данный радионуклидный индикатор используется для оценки активности симпатической нервной системы миокарда и позволяет прогнозировать неблагоприятные сердечно-сосудистые события у больных с хронической сердечной недостаточностью [47]. В нескольких исследованиях было показано, что радиомический анализ сцинтиграмм, полученных при использовании ^{123}I -MIBG, повышает прогностическую ценность метода у данной категории больных [47].

Необходимо учитывать, что радиомический анализ независимо от модальности очень чувствителен к факторам, влияющим на качество получаемого изображе-

ния. В связи с этим крайне важно оценивать зависимость радиомических характеристик ОФЭКТ сердца от параметров получения и реконструкции скинтиграмм. С этой целью рекомендуется для каждой радиомической характеристики рассчитывать коэффициент вариации (CV) [44]. При этом низкие значения данного коэффициента указывают на высокую воспроизводимость радиомических характеристик и их независимость от параметров получения изображений [44].

Ограничения и преимущества метода. Несмотря на то, что радиомика является перспективным методом для персонализации лечения пациентов с кардиологической патологией, ее клиническая значимость еще не определена [5, 7, 13, 32, 33, 41]. Это обусловлено отсутствием единой методологии применения радиомики в кардиологии, отсутствием многоцентровых исследований, сложностями в интерпретации выявленных радиомических маркеров, отсутствием четких патофизиологических объяснений изменения радиомических показателей. Большинство работ, выполненных с применением радиомики у больных кардиологического профиля, не соответствует принятым на сегодняшний день системам оценки качества радиомических исследований RQS (radiomic quality score) и TRIPOD (система принятия клинических решений). Кроме того, до сих пор не выполнена оценка воспроизводимости радиомического анализа изображений, полученных на различном сканирующем оборудовании от разных производителей, не проведен анализ экономической эффективности нового метода [5, 7, 13, 32, 33, 41].

Для использования радиомики в клинической работе необходимо соответствующее программное обеспечение, которое позволило бы врачу без лишних манипуляций получить и правильно интерпретировать данные. На данный момент никто не разработал подобные программные решения. Из-за этого радиомика пригодна только в исследовательских проектах для выявления текстурных изменений, которые в теории можно будет применять для написания программ автоматического анализа медицинских изображений.

Для построения прогностических моделей на основе радиомического анализа необходимо применять сложные математические методы обработки данных. В последние годы радиомика становится основой для машинного обучения и построения нейросетей. Это открывает путь к использованию искусственного интеллекта в медицине [5, 7, 13, 19, 21, 33, 41, 48–50].

В то же время радиомика имеет перспективы выступить в качестве альтернативы лучевым методам с использованием внутривенного введения контрастного вещества, а в случае использования МРТ может позволить сократить время сканирования сердца, так как позволяет получать дополнительную информацию из нативных T1- и T2-взвешенных изображений [32, 33]. К преимуществам метода относятся также большое количество извлекаемых радиомических показателей, что дает возможность персонализировать диагностику и лечение кардиологической патологии [4, 7, 13, 32, 33].

Таким образом, радиомика имеет потенциал стать современным инструментом персонализированной диагностики заболеваний сердечно-сосудистой системы. Стандартизация и валидация методики, а также мультицентровая оценка ее диагностической и прогностической ценности позволят в будущем внедрить радиомику в клиническую практику. Использование в радиомике мультимодальной визуализации, геномных, гистологических и иных биомаркеров даст возможность повысить специфичность и прогностическую ценность получаемых радиомических характеристик изображений.

Заключение. На данный момент радиомика представляет собой дополнительный инструмент визуализации. Стандартизация и валидация методики позволит внедрить радиомику в клиническую практику и перейти к персонализированной медицине. В кардиологии применение метода даст возможность выявлять новые диагностические и прогностические маркеры, более точно описывающие заболевание у конкретного пациента, что позволит более точно просчитывать риски.

Сведения об авторах:

Попов Евгений Викторович — аспирант лаборатории радионуклидных методов исследования научно-исследовательского института кардиологии, Томский национальный исследовательский медицинский центр Российской академии наук; 634012, Томск, Киевская ул., д. 111а; e-mail: popov-evgeniy92@mail.com; ORCID 0000–0003–0772–6042; SPIN 4812–5888;

Кривоногов Николай Георгиевич — доктор медицинских наук, старший научный сотрудник лаборатории радионуклидных методов исследования научно-исследовательского института кардиологии, Томский национальный исследовательский медицинский центр Российской академии наук, 634012, Томск, Киевская ул., д. 111а; e-mail: kng@cardio-tomsk.ru; ORCID 0000–0003–2848–3254; SPIN 4995–3816;

Округин Сергей Анатольевич — доктор медицинских наук, старший научный сотрудник отделения общеклинической кардиологии и эпидемиологии сердечно-сосудистых заболеваний научно-исследовательского института кардиологии, Томский национальный исследовательский медицинский центр Российской академии наук; 634012, Томск, Киевская ул., д. 111а; e-mail: sao@cardio-tomsk.ru; ORCID 0000–0002–1355–0154; SPIN 5351–6132;

Сазонова Светлана Ивановна — доктор медицинских наук, и.о. заведующего научного руководителя лаборатории радионуклидных методов исследования научно-исследовательского института кардиологии, Томский национальный исследовательский медицинский центр Российской академии наук; 634012, Томск, Киевская ул., д. 111а; e-mail: sazonova_si@mail.ru; ORCID 0000–0003–2799–3260; SPIN 3787–2774.

Information about the authors:

Evgeniy V. Popov — Postgraduate student in the nuclear department of Cardiology Research Institute, Tomsk National Research Medical Centre, Russian Academy of sciences; St. Kievskaya 111a, Tomsk, Russian Federation, 634012; e-mail: popov-evgeniy92@mail.com; ORCID 0000–0003–0772–6042; SPIN 4812–5888;

Nikolay G. Krivonogov — Dr. of Sci. (Med.), Senior researcher in the nuclear department of Cardiology Research Institute, Tomsk National Research Medical Centre, Russian Academy of sciences, Tomsk, Russian Federation, 634012; e-mail: kng@cardio-tomsk.ru; ORCID 0000–0003–2848–3254; SPIN 4995–3816;

Sergey A. Okrugin — Dr. of Sci. (Med.), Senior researcher in the Department of General Clinical Cardiology and Epidemiology of Cardiovascular Diseases of Cardiology Research Institute, Tomsk National Research Medical Centre, Russian Academy of sciences, Tomsk, Russian Federation, 634012; e-mail: sao@cardio-tomsk.ru; ORCID 0000–0002–1355–0154; SPIN 5351–6132;

Sazonova Svetlana — Dr. of Sci. (Med.), Acting supervisor in the nuclear department of Cardiology Research Institute, Tomsk National Research Medical Centre, Russian Academy of sciences, St. Kievskaya 111a, Tomsk, Russian Federation, 634012; e-mail: sazonoval_si@mail.ru; ORCID 0000-0003-2799-326; SPIN 3787-2774.

Вклад авторов. Все авторы подтверждают соответствие своего авторства, согласно международным критериям ICMJE (все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией).

Author contribution. All authors met the ICMJE authorship criteria.

Потенциальный конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Disclosure. The authors declare that they have no competing interests.

Поступила /Received: 27.05.2022

Принята к печати / Accepted: 16.06.2022

Опубликована / Published: 30.06.2022

ЛИТЕРАТУРА/REFERENCES

- Ginsburg G.S., Willard H.F. Genomic and personalized medicine: foundations and applications // *Translational research*. 2009. Vol. 154, No. 6. P. 277–287. doi: 10.1016/j.trsl.2009.09.005.
- Hassani C., Saremi F., Varghese B.A., Duddalwar V. Myocardial Radiomics in Cardiac MRI // *American Journal of Roentgenology*. 2020. Vol. 214, No. 3. P. 536–545. doi: 10.2214/AJR.19.21986.
- Lambin P., Rios-Velazquez E., Leijenaar R., Carvalho S., van Stiphout R.G., Granton P., Zegers C.M., Gillies R., Boellard R., Dekker A., Aerts H.J. Radiomics: extracting more information from medical images using advanced feature analysis // *European Journal of Cancer*. 2012. Vol. 48, No. 4. P. 441–446. doi: 10.1016/j.ejca.2011.11.036.
- Lambin P., Leijenaar R.T.H., Deist T.M., Peerlings J., de Jong E.E.C., van Timmeren J., Sanduleanu S., Larue R.T.H.M., Even A.J.G., Jochems A., van Wijk Y., Woodruff H., van Soest J., Lustberg T., Roelofs E., van Elmpt W., Dekker A., Mottaghy F.M., Wildberger J.E., Walsh S. Radiomics: the bridge between medical imaging and personalized medicine // *Nature Reviews Clinical Oncology*. 2017. Vol. 14, No. 12. P. 749–762. doi: 10.1038/nrclinonc.2017.141.
- Shaikh F., Franc B., Mulero F. Radiomics as Applied in Precision Medicine // *Clinical Nuclear Medicine*. Ahmadzadehfar H., Biersack H.J., Freeman L.M., Zuckier L.S., eds. 2nd ed. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 2020. Vol. 193–206.
- Zwanenburg A., Vallières M., Abdalah MA., Aerts H.J.W.L., Andrearczyk V., Apte A., Ashrafinia S., Bakas S., Beukinga R.J., Boellaard R., Bogowicz M., Boldrini L., Buvat I., Cook GJR., Davatzikos C., Depeursinge A., Desserot MC., Dinapoli N., Dinh CV., Echegaray S., El Naqa I., Fedorov AY., Gatta R., Gillies R.J., Goh V., Götz M., Guckenberger M., Ha S.M., Hatt M., Isensee F., Lambin P., Leger S., Leijenaar R.T.H., Lenkiewicz J., Lippert F., Losnegård A., Maier-Hein K.H., Morin O., Müller H., Napel S., Nioche C., Orhac F., Pati S., Pfahler E.A.G., Rahmim A., Rao A.U.K., Scherer J., Siddique M.M., Sijtsma N.M., Socarras Fernandez J., Spezi E., Steenbakkers R.J.H.M., Tanadini-Lang S., Thorwarth D., Troost E.G.C., Upadhaya T., Valentini V., van Dijk LV., van Griethuysen J., van Velden F.H.P., Whybra P., Richter C., Löck S. The Image Biomarker Standardization Initiative: Standardized Quantitative Radiomics for High-Throughput Image-based Phenotyping // *Radiology*. 2020. Vol. 295, No. 2. P. 328–338. doi: 10.1148/radiol.2020191145.
- Mayerhoefer M.E., Materka A., Langs G., Häggström I., Szczypiński P., Gibbs P., Cook G. Introduction to Radiomics // *The Journal of Nuclear Medicine*. 2020. Vol. 61, No. 4. P. 488–495. doi: 10.2967/jnumed.118.222893.
- Fedorov A., Beichel R., Kalpathy-Cramer J., Finet J., Fillion-Robin J.C., Pujol S., Bauer C., Jennings D., Fennessy F., Sonka M., Buatti J., Aylward S., Miller J.V., Pieper S., Kikinis R. 3D Slicer as an image computing platform for the Quantitative Imaging Network // *Magnetic Resonance Imaging*. 2012. Vol. 30, No. 9. P. 1323–1341. doi: 10.1016/j.mri.2012.05.001.
- Mahon R.N., Ghita M., Hugo G.D., Weiss E. ComBat harmonization for radiomic features in independent phantom and lung cancer patient computed tomography datasets // *Physics in Medicine and Biology*. 2020. Vol. 65, No. 1. P. 015010. doi: 10.1088/1361-6560/ab6177.
- Kothari G., Korte J., Lehrer E.J., Zaorsky N.G., Lazarakis S., Kron T., Hardcastle N., Siva S. A systematic review and meta-analysis of the prognostic value of radiomics based models in non-small cell lung cancer treated with curative radiotherapy // *Radiotherapy and Oncology*. 2021. Vol. 155. P. 188–203. doi: 10.1016/j.radonc.2020.10.023.
- Park J.E., Kim H.S., Kim D., Park S.Y., Kim J.Y., Cho S.J., Kim J.H. A systematic review reporting quality of radiomics research in neuro-oncology: toward clinical utility and quality improvement using high-dimensional imaging features // *BMC Cancer*. 2020. Vol. 20, No. 1. P. 29. doi: 10.1186/s12885-019-6504-5.
- Sanduleanu S., Woodruff H.C., de Jong E.E.C., van Timmeren J.E., Jochems A., Dubois L., Lambin P. Tracking tumor biology with radiomics: A systematic review utilizing a radiomics quality score // *Radiotherapy and Oncology*. 2018. Vol. 127, No. 3. P. 349–360. doi: 10.1016/j.radonc.2018.03.033
- Yip S.S., Aerts H.J. Applications and limitations of radiomics // *Physics in Medicine and Biology*. 2016. Vol. 61, No. 13. P. R150–166. doi: 10.1088/0031-9155/61/13/R150.
- Ilyushenkova Yu., Sazonova S., Popov E., Zavadovsky K., Batalov R., Archakov E., Moskovskikh T., Popov S., Minin S., Romanov A. Radiomic phenotype of epicardial adipose tissue in the prognosis of atrial fibrillation recurrence after catheter ablation in patients with isolated atrial fibrillation., 2022., PREPRINT (Version 1) available at Research Square. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-1456502/v1>.
- Koskinas K.C., Ughi G.J., Windecker S., Tearney G.J., Räber L. Intracoronary imaging of coronary atherosclerosis: validation for diagnosis, prognosis and treatment // *European Heart Journal*. 2016. 7. Vol. 37, No. 6. P. 524–535a-c. doi: 10.1093/eurheartj/ehv642.
- Меркулова И.Н., Шария М.А., Миронов В.М., Шабанова М.С., Веселова Т.Н., Гаман С.А., Барышева Н.А., Шахнович Р.М., Жукова Н.С., Сухинина Т.Н., Староверов И.И., Терновой С.К. Возможности компьютерной томографии в выявлении атеросклеротических бляшек высокого риска у больных с острым коронарным синдромом без подъема сегмента ST: сопоставление с внутрисосудистым ультразвуковым исследованием // *Кардиология*. 2020. Т. 60, № 12. С. 64–75. Merkulova I.N., Shariya M.A., Mironov V.M., Shabanova M.S., Veselova T.N., Gaman S.A., Barysheva N.A., Shakhnovich R.M., Zhukova N.S., Sukhinina T.N., Staroverov I.I., Ternovoy S.K. Vozmozhnosti komp'yuternoy tomografii v vyavlenii ateroskleroticheskikh blyashek vysokogo riska u bol'nykh s ostrym koronarnym sindromom bez pod'yema segmenta ST: sopostavleniye s vnutrisosudistym ul'trazvukovym issledovaniyem // *Kardiologiya*. 2020. T. 60, No. 12. S. 64–75. [Merkulova I.N., Shariya M.A., Mironov V.M., Shabanova M.S., Veselova T.N., Gaman S.A., Barysheva N.A., Shakhnovich R.M., Zhukova N.I., Sukhinina T.S., Staroverov I.I., Ternovoy S.K. Computed Tomography Coronary Angiography Possibilities in «High Risk» Plaque Identification in Patients with non-ST-Elevation Acute Coronary Syndrome: Comparison with Intravascular Ultrasound. *Kardiologiya*, 2020, Vol. 60, No. 12, pp. 64–75 (In Russ.)] <https://doi.org/10.18087/cardio.2020.12.n1304>.
- Knuuti J., Wijns W., Saraste A., Capodanno D., Barbato E., Funck-Brentano C., Prescott E., Storey R.F., Deaton C., Cuisset T., Agewall S., Dickstein K., Edvardsen T., Escaned J., Gersh B.J., Svitil P., Gilard M., Hasdai D., Hatala R., Mahfoud F., Masip J., Muneretto C., Valgimigli M., Achenbach S., Bax J.J. Vol. ESC Scientific Document Group. 2019 ESC Guidelines for the diagnosis and management of chronic coronary syndromes // *European Heart Journal*. 2020. Vol. 41, No. 3. P. 407–477. doi: 10.1093/eurheartj/ehz425.
- Kolossváry M., Karady J., Szilveszter B., Kitzlaar P., Hoffmann U., Merkely B., Maurovich-Horvat P. Radiomic features are superior to conventional quantitative computed tomographic metrics to identify coronary plaques with Napkin-Ring Sign // *Circulation: Cardiovascular Imaging*. 2017. Vol. 10, No. 12. doi: 10.1161/circimaging.117.006843
- Kolossváry M., Kellermayer M., Merkely B., Maurovich-Horvat P., Maurovich-Horvat P. Cardiac computed tomography radiomics: a comprehensive review on radiomic techniques // *Journal of Thoracic Imaging*. 2018. Vol. 33, No. 1. P. 26–34. doi: 10.1097/RTI.0000000000000268
- Kolossváry M., Park J., Bang J.I., Zhang J., Lee J.M., Paeng J.C., Merkely B., Narula J., Kubo T., Akasaka T., Koo B.K., Maurovich-Horvat P. Identification of invasive and radionuclide imaging markers of coronary plaque vulnerability using radiomic analysis of coronary computed tomography angiography // *European Heart Journal — Cardiovascular Imaging*. 2019. Vol. 20, No. 11. P. 1250–1258. doi: 10.1093/ehjci/jez033
- Kolossváry M., De Cecco C.N., Feuchtnr G., Maurovich-Horvat P. Advanced atherosclerosis imaging by CT: Radiomics., machine learning and deep learning // *Journal of Cardiovascular Computed Tomography*. 2019. Vol. 13, No. 5. P. 274–280. doi: 10.1016/j.jcct.2019.04.007.
- Варламова Ю.В., Сазонова С.И., Попов Е.В., Баталов Р.Е., Московских Т.В., Попов С.В., Минин С.М., Романов А.Б. Исследование влияния характеристик эпикардиальной жировой ткани и симпатической иннервации миокарда на развитие поздних рецидивов фибрилляции предсердий после радиочастотной абляции // *Российский кардиологический журнал*. 2021. Т. 26, № 12. e4788. Varlamova Yu.V., Sazonova S.I., Popov Ye.V., Batalov R.Ye., Moskovskikh T.V., Popov S.V., Minin S.M., Romanov A.B.

- Issledovaniye vliyaniya kharakteristik epikardial'noy zhirovoy tkani i simpatichey innervatsii miokarda na razvitiye pozdnykh retsidivov fibrillyatsii predserdiy posle radiochastotnoy ablatzii // *Rossiyskiy kardiologicheskiy zhurnal*. 2021. T. 26, No. 12. e4788. [Varlamova Yu.V., Sazonova S.I., Popov E.V., Batalov R.E., Moskovskikh T.V., Popov S.V., Minin S.M., Romanov A.B. Influence of characteristics of epicardial adipose tissue and myocardial sympathetic innervation on the development of late recurrence of atrial fibrillation after radiofrequency ablation. *Russian Journal of Cardiology*, 2021, Vol. 26, No. 12, e4788 (In Russ.) doi: 10.15829/1560-4071-2021-4788.
23. Попов Е.В., Анашбаев Ж.Ж., Мальцева А.Н., Сазонова С.И. Радиомические характеристики текстурных изменений эпикардальной жировой ткани при атеросклеротическом поражении коронарных артерий // *Комплексные проблемы сердечно-сосудистых заболеваний*. 2021. Т. 10, № 4. С. 6–16. Попов Е.В., Анашбаев Ж.Ж., Мальцева А.Н., Сазонова С.И. Радиомические характеристики текстурных изменений эпикардальной жировой ткани при атеросклеротическом поражении коронарных артерий // *Комплексные проблемы сердечно-сосудистых заболеваний*. 2021. Т. 10, No. 4. S. 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, Vol. 10, No. 4, pp. 6–16 (In Russ.) doi: 10.17802/2306-1278-2021-10-4-6-16.
 24. Edalat-Javid M., Shiri I., Hajianfar G., Abdollahi H., Arabi H., Oveis N., Javadian M., Shamsaei Zafarghandi M., Malek H., Bitarafan-Rajabi A., Oveis M., Zaidi H. Cardiac SPECT radiomic features repeatability and reproducibility: A multi-scanner phantom study // *Journal of Nuclear Cardiology*. 2021. Vol. 28, No. 6. P. 2730–2744. doi: 10.1007/s12350-020-02109-0.
 25. Jang J., Ngo L.H., Mancio J., Kucukseymen S., Rodriguez J., Pierce P., Goddu B., Nezafat R. Reproducibility of Segmentation-based Myocardial Radiomic Features with Cardiac MRI // *Radiology. Cardiothoracic Imaging*. 2020. Vol. 2, No. 3. P. e190216. doi: 10.1148/ryct.2020190216.
 26. Khawaja T., Greer C., Thadani S.R., Kato T.S., Bhatia K., Shimbo D., Kontak A., Bokhari S., Einstein A.J., Schulze P.C. Increased regional epicardial fat volume associated with reversible myocardial ischemia in patients with suspected coronary artery disease // *Journal of Nuclear Cardiology*. 2015. Vol. 22, No. 2. P. 325–333. doi: 10.1007/s12350-014-0004-4.
 27. Kim J.K., Park H.W. Statistical textural features for detection of microcalcifications in digitized mammograms // *IEEE Transaction on Medical Imaging*. 1999. Vol. 18, No. 3. P. 231–238. doi: 10.1109/42.764896.
 28. Klüner L.V., Oikonomou E.K., Antoniadis C. Assessing Cardiovascular Risk by Using the Fat Attenuation Index in Coronary CT Angiography // *Radiology. Cardiothoracic Imaging*. 2021. Vol. 3, No. 1. P. e200563. doi: 10.1148/ryct.202100563.
 29. Currie G., Iqbal B., Kiat H. Intelligent Imaging: Radiomics and Artificial Neural Networks in Heart Failure // *Journal of Medical Imaging and Radiation Sciences*. 2019. Vol. 50, No. 4. P. 571–574. doi: 10.1016/j.jmir.2019.08.006.
 30. Oikonomou E.K., Siddique M., Antoniadis C. Artificial intelligence in medical imaging: A radiomic guide to precision phenotyping of cardiovascular disease // *Cardiovascular Research*. 2020. Vol. 116, No. 13. P. 2040–2054. doi: 10.1093/cvr/cvaa021.
 31. Oikonomou E.K., Williams M.C., Kotanidis C.P. et al. A novel machine learning-derived radiotranscriptomic signature of perivascular fat improves cardiac risk prediction using coronary CT-angiography // *European Heart Journal*. 2019. Vol. 40, No. 43. P. 3529–3543. doi: 10.1093/eurheartj/ehz592.
 32. Spearman J.V., Meinel F.G., Schoepf U.J., Apfaltrer P., Silverman J.R., Krazinski A.W., Canstein C., De Cecco C.N., Costello P., Geyer L.L. Automated quantification of epicardial adipose tissue using CT angiography: evaluation of a prototype software // *European Radiology*. 2014. Vol. 24, No. 2. P. 519–526. doi: 10.1007/s00330-013-3052-2.
 33. Raisi-Estabragh Z., Izquierdo Z., Campello V.M., Martin-Isla C., Jaggi A., Harvey N.C., Lekadir K., Petersen S.E. Cardiac magnetic resonance radiomics: basic principles and clinical perspectives // *European Heart Journal: Cardiovascular Imaging*. 2020. Vol. 21, No. 4. P. 349–356. doi: 10.1093/ehjci/jeaa028.
 34. Baessler B., Luecke C., Lurz J., Klingel K., von Roeder M., de Waha S., Besler C., Maintz D., Gutberlet M., Thiele H., Lurz P. Cardiac MRI Texture Analysis of T1 and T2 Maps in Patients with Infarctlike Acute Myocarditis // *Radiology*. 2018. Vol. 289, No. 2. P. 357–365. doi: 10.1148/radiol.2018180411.
 35. Cheng K., Lin A., Yuvaraj J., Nicholls S.J., Wong D.T.L. Cardiac Computed Tomography Radiomics for the Non-Invasive Assessment of Coronary Inflammation // *Cells*. 2021. Vol. 10, No. 4. P. 879. doi: 10.3390/cells10040879.
 36. Chen B.H., An D.A., He J., Wu C.W., Yue T., Wu R., Shi R.Y., Eteer K., Joseph B., Hu J., Xu J.R., Wu L.M., Pu J. 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 // *European Radiology*. 2021. Vol. 31, No. 1. P. 504–514. doi: 10.1007/s00330-020-07117-9.
 37. Joshi N.V., Vesey A.T., Williams M.C., Shah A.S., Calvert P.A., Craighead F.H., Yeoh S.E., Wallace W., Salter D., Fletcher A.M., van Beek E.J., Flapan A.D., Uren N.G., Behan M.W., Cruden N.L., Mills N.L., Fox K.A., Rudd J.H., Dweck M.R., Newby D.E. 18F-fluoride positron emission tomography for identification of ruptured and high-risk coronary atherosclerotic plaques: a prospective clinical trial // *Lancet*. 2014. Vol. 383, No. 9918. P. 705–713. doi: 10.1016/S0140-6736(13)61754-7.
 38. Neisius U., El-Rewaity H., Nakamori S., Rodríguez J., Manning W.J., Nezafat R. Radiomic Analysis of Myocardial Native T1 Imaging Discriminates Between Hypertensive Heart Disease and Hypertrophic Cardiomyopathy // *JACC Cardiovascular Imaging*. 2019. Vol. 12, No. 10. P. 1946–1954. doi: 10.1016/j.jcmg.2018.11.024.
 39. Cheng S., Fang M., Cui C., Chen X., Yin G., Prasad S.K., Dong D., Tian J., Zhao S. LGE-CMR-derived texture features reflect poor prognosis in hypertrophic cardiomyopathy patients with systolic dysfunction: preliminary results // *European Radiology*. 2018. Vol. 28, No. 11. P. 4615–4624. doi: 10.1007/s00330-018-5391-5.
 40. Larroza A., López-Lereu M.P., Monmeneu J.V., Gavara J., Chorro F.J., Bodi V., Moratal D. Texture analysis of cardiac cine magnetic resonance imaging to detect nonviable segments in patients with chronic myocardial infarction // *Medical Physics*. 2018. Vol. 45, No. 4. P. 1471–1480. doi: 10.1002/mp.12783.
 41. Lee S., Han K., Suh Y.J. Quality assessment of radiomics research in cardiac CT: a systematic review // *European Radiology*. 2022. Vol. 32. P. 3458–3468. doi: 10.1007/s00330-021-08429-0.
 42. Ma Q., Ma Y., Wang X., Li S., Yu T., Duan W., Wu J., Wen Z., Jiao Y., Sun Z., Hou Y. A radiomic nomogram for prediction of major adverse cardiac events in ST-segment elevation myocardial infarction // *European Radiology*. 2021. Vol. 31, No. 2. P. 1140–1150. doi: 10.1007/s00330-020-07176-y.
 43. Cetin I., Raisi-Estabragh Z., Petersen S.E., Napel S., Piechnik S.K., Neubauer S., Gonzalez Ballester M.A., Camara O., Lekadir K. Radiomics Signatures of Cardiovascular Risk Factors in Cardiac MRI: Results From the UK Biobank // *Frontiers in Cardiovascular Medicine*. 2020. 2. Vol. 7. P. 591368. doi: 10.3389/fcvm.2020.591368.
 44. Ginsburg G.S., Donahue M.P., Newby L.K. Prospects for personalized cardiovascular medicine: the impact of genomics // *Journal of the American College of Cardiology*. 2005. Vol. 46, No. 9. P. 1615–1627. doi: 10.1016/j.jacc.2005.06.075.
 45. Radiomics Analysis of Clinical Myocardial Perfusion Stress SPECT Images to Identify Coronary Artery Calcification. Ashrafinia S., Dalaie P., Sadaghiani M.S., Schindler T.H., Pomper M.G., Rahmim A // *medRxiv* 2021.01.29.21250803. doi: https://doi.org/10.1101/2021.01.29.21250803.
 46. Baeßler B., Mannil M., Maintz D., Alkadhi H., Manka R. Texture analysis and machine learning of non-contrast T1-weighted MR images in patients with hypertrophic cardiomyopathy-Preliminary results // *European Journal of Radiology*. 2018. Vol. 102. P. 61–67. doi: 10.1016/j.ejrad.2018.03.013.
 47. Dey D., Wong N.D., Tamarappoo B., Nakazato R., Gransar H., Cheng V.Y., Ramesh A., Kakadiaris I., Germano G., Slomka P.J., Berman D.S. Computer-aided non-contrast CT-based quantification of pericardial and thoracic fat and their associations with coronary calcium and Metabolic Syndrome // *Atherosclerosis*. 2010. Vol. 209, No. 1. P. 136–141. doi: 10.1016/j.atherosclerosis.2009.08.032.
 48. Kolossváry M., Jávorszky N., Karády J., Vecsey-Nagy M., Dávid T.Z., Simon J., Szilveszter B., Merkely B., Maurovich-Horvat P. Effect of vessel wall segmentation on volumetric and radiomic parameters of coronary plaques with adverse characteristics // *Journal of Cardiovascular Computed Tomography*. 2021. Vol. 15, No. 2. P. 137–145. doi: 10.1016/j.jcct.2020.08.001.
 49. Kolossváry M., Szilveszter B., Karády J., Drobni Z.D., Merkely B., Maurovich-Horvat P. Effect of image reconstruction algorithms on volumetric and radiomic parameters of coronary plaques // *Journal of Cardiovascular Computed Tomography*. 2019. Vol. 13, No. 6. P. 325–330. doi: 10.1016/j.jcct.2018.11.004.
 50. Kolossváry M., Karády J., Kikuchi Y., Ivanov A., Schlett C.L., Lu M.T., Foldyna B., Merkely B., Aerts H.J., Hoffmann U., Maurovich-Horvat P. Radiomics versus Visual and Histogram-based Assessment to Identify Atheromatous Lesions at Coronary CT Angiography: An ex Vivo Study // *Radiology*. 2019. Vol. 293, No. 1. P. 89–96. doi: 10.1148/radiol.2019190407.