

Возможности радиомического анализа МРТ-изображений сердца в кино-режиме в определении постинфарктных областей миокарда левого желудочка

А.С. Максимова¹, Д.С. Саматов², Б.С. Мерзликин², Т.А. Шелковникова¹, А.И. Листратов³, К.В. Завадовский¹

¹ Научно-исследовательский институт кардиологии, Томский национальный исследовательский медицинский центр Российской академии наук, Томск, Россия;

² Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия;

³ Сибирский государственный медицинский университет, Томск, Россия

АННОТАЦИЯ

Обоснование. Размер и локализация, а также чёткая дифференциация между интактной тканью и областью инфаркта важны для клинической диагностики и прецизионной медицины. В основе данной работы лежит исследование радиомических признаков, которые позволяют дифференцировать участки инфарктной и удалённой от области инфаркта ткани по данным бесконтрастных изображений магнитно-резонансной томографии (МРТ) сердца в кино-режиме.

Цель. Оценка возможностей и информативности радиомического анализа в выявлении постинфарктных областей миокарда левого желудочка у пациентов с ишемической кардиомиопатией (ИКМП) по данным бесконтрастных изображений МРТ сердца в кино-режиме.

Материалы и методы. Мы проанализировали результаты МРТ сердца с контрастированием 33 пациентов, которым провели хирургическое лечение по поводу ИКМП. Текстуальный анализ выполнили для 66 участков изображений МРТ сердца в кино-режиме, для каждого из них определяли 105 текстурных характеристик. МРТ сердца проводили по стандартной методике на магнитно-резонансном томографе Vantage Titan (Toshiba) 1,5 Тл. Для текстурного анализа использовали программное обеспечение 3D slicer-version 5.2.2, Pyradiomics.

Результаты. В ходе исследования мы построили диаграммы коллинеарности признаков, определили признаки с нулевой важностью и установили важность признаков с помощью алгоритма градиентного бустинга, а также оценили кумулятивную важность признаков в зависимости от их общего количества. С помощью метода выявления признаков с низкой важностью определили параметры с наименьшей значимостью, которые не влияют на указанный общий уровень. Используя метод выявления признаков с единственным значением, мы не нашли соответствующих функций. По результатам анализа сформирована ROC-кривая для логистической регрессии Lasso (Se=57,14%, Sp=71,43%, AUC=0,76). Основным результатом данного исследования является определение радиомических признаков, характеризующих на основе изображений МРТ сердца в кино-режиме участки, соответствующие постинфарктному кардиосклерозу и интактной стенке левого желудочка.

Заключение. Данное исследование показало, что применение радиомического анализа на бесконтрастных изображениях МРТ сердца в кино-режиме является перспективным подходом для выявления участков, соответствующих инфаркту миокарда и интактной стенке. Метод потенциально может быть использован для идентификации областей постинфарктного кардиосклероза у пациентов с ИКМП без применения контрастных препаратов.

Ключевые слова: радиомика; текстуальный анализ; магнитно-резонансная томография сердца; инфаркт миокарда; ишемическая кардиомиопатия.

КАК ЦИТИРОВАТЬ:

Максимова А.С., Саматов Д.С., Мерзликин Б.С., Шелковникова Т.А., Листратов А.И., Завадовский К.В. Возможности радиомического анализа МРТ-изображений сердца в кино-режиме в определении постинфарктных областей миокарда левого желудочка // Digital Diagnostics. 2024. Т. 5, № 4. С. XX–XX. DOI: <https://doi.org/10.17816/DD630602>

Статья получена: 27.04.2024

Статья одобрена: 18.07.2024

Accepted for publication

Radiomics applications in non-contrast cine cardiac magnetic resonance imaging in the detection of left ventricular postinfarction cardiosclerosis

Aleksandra S. Maksimova¹, Denis S. Samatov², Boris S. Merzlikin², Tatyana A. Shelkovnikova¹, Artem I. Listratov³, Konstantin V. Zavadovsky¹

¹ Tomsk National Research Medical Center of the Russian Academy of Sciences, Tomsk, Russia;

² National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia;

³ Siberian State Medical University, Tomsk, Russia

ABSTRACT

BACKGROUND: Size and localization, as well as clear differentiation between intact tissue and infarcted area, are important for clinical diagnosis and precision medicine. This work is based on the study of radiomics features capable of differentiating areas of infarcted and distant tissue from the infarct area using data from non-contrast cine cardiac magnetic resonance imaging (MRI).

AIM: Evaluation of the possibilities and informativeness of radiomics analysis in detection of postinfarction areas of the left ventricular myocardium in patients with ischemic cardiomyopathy (ICMP) by contrast-free cine cardiac MRI images.

MATERIALS AND METHODS: The results of contrast enhancement cardiac MRI with of 33 patients undergoing surgical treatment for ICMP were analyzed. Texture analysis was performed on 66 sections of cine cardiac MRI images, and 105 texture characteristics were determined for each of them. Cardiac MRI was performed according to the standard technique on a Vantage Titan (Toshiba) 1.5 T. Texture analysis was performed using 3D slicer-version 5.2.2 software, SlicerRadiomics

RESULTS: Collinearity diagrams of the features were constructed. We also identified the features with zero importance and established the importance of the features using the gradient boosting algorithm. In addition, the cumulative importance of the features as a function of their total number was estimated. Using the method of identifying features with low importance, we identified the parameters with the lowest importance that do not affect the indicated total level. Using the method of identifying features with a single value, we did not find features with a single unique value. In addition, ROC curve for Lasso logistic regression (Se=57.14% Sp=71.43%, AUC=0.76) was generated based on the results of the analysis. The main result of this study is the identification of radiomics features able to characterize the areas corresponding to postinfarction cardiosclerosis and intact LV wall on the basis of cine cardiac MRI images.

CONCLUSION: This study has shown that the use of radiomics analysis on contrast-free cine cardiac MRI images is a promising approach to identify areas corresponding to myocardial infarction and intact wall and could potentially be used as to identify areas of postinfarction cardiosclerosis in patients with ICMP without the use of contrast agents.

Keywords: radiomics; texture analysis; cardiac magnetic resonance imaging; myocardial infarction; ischemic cardiomyopathy.

TO CITE THIS ARTICLE:

Maksimova AS, Samatov DS, Merzlikin BS, Shelkovnikova TA, Listratov AI, Zavadovsky KV. Radiomics applications in non-contrast cine cardiac magnetic resonance imaging in the detection of left ventricular postinfarction cardiosclerosis. *Digital Diagnostics*. 2024;5(4):XX-XX. DOI: <https://doi.org/10.17816/DD630602>

Received: 27.04.2024

Accepted: 18.07.2024

Published online: 13.11.2024

The article can be used under the CC BY-NC-ND 4.0 International License
© Eco-Vector, 2024

ОБОСНОВАНИЕ

Частота сердечно-сосудистых заболеваний неумолимо растёт с каждым годом. Лидирующую позицию в структуре их осложнений занимает ишемическая болезнь сердца, которая является основной причиной смертности и инвалидности взрослого населения во всём мире [1]. Одна из её наиболее распространённых форм — инфаркт миокарда (ИМ), характеризующийся необратимым некрозом сердечной мышцы, вызванным острым нарушением коронарного кровообращения [2, 3]. Определение размера и локализации, а также чёткая дифференциация между интактной тканью и областью инфаркта важны для клинической диагностики и прецизионной медицины [4]. Нередко после перенесённого ИМ происходит ремоделирование левого желудочка (ЛЖ) — процесс, клинически проявляющийся изменением размеров и функции ЛЖ, начинающийся в первые часы после нарушения коронарного кровообращения и в дальнейшем прогрессирующий [5]. Патофизиология постинфарктного ремоделирования ЛЖ сложна и включает множество ультраструктурных, метаболических и нейромедиаторных процессов, происходящих в инфарктном и удалённом от области инфаркта миокарде. Ремоделирование сердца принято считать определяющим фактором клинического течения сердечной недостаточности [6].

МРТ сердца с контрастированием — один из ключевых и наиболее важных методов диагностики наличия, распространённости и выраженности постинфарктных изменений миокарда. Данный метод используется также для определения жизнеспособности миокарда и ремоделирования ЛЖ. МРТ сердца позволяет количественно оценить размер ИМ, выявить зоны микрососудистой обструкции и геморрагического пропитывания — это ключевые факторы, определяющие неблагоприятное ремоделирование, и предикторы неблагоприятных сердечно-сосудистых исходов [7–9]. Однако метод имеет ряд ограничений, в том числе зависимость от субъективной оценки врача и внутриоператорскую вариабельность. Кроме того, использование гадолиний-содержащих препаратов у пациентов с почечной недостаточностью может привести к нефрогенному системному фиброзу [10] — это важная проблема в клинической практике из-за частоты коморбидных заболеваний почек и сердца у пациентов кардиологического профиля [11].

Одно из быстроразвивающихся направлений углублённого анализа цифровых медицинских изображений — радиомика и текстурный анализ. Радиомика — технология, позволяющая точно охарактеризовать патологические изменения, обнаруженные при анализе цифровых медицинских изображений, путём преобразования данных визуализирующих методов в количественные показатели. Ранее уже проводили исследования эффективности текстурного анализа МРТ-изображений сердца для выявления условно здоровых и нежизнеспособных сегментов миокарда [12], некоторые из них были сосредоточены на обнаружении рубцовых изменений миокарда ЛЖ на бесконтрастных изображениях МРТ сердца в кино-режиме [13]. Очевидно, что морфологические особенности миокарда в области рубца отличаются от интактного миокарда, и, как следствие, текстурные характеристики данных участков должны отличаться [14]. Предположения о том, что неяркие различия между нежизнеспособными и условно здоровыми сегментами присутствуют и на изображениях МРТ сердца в кино-режиме и могут быть обнаружены с помощью радиомического анализа, демонстрируя разную гетерогенность уровня серого, на сегодняшний день подтверждаются немногочисленными исследованиями [15, 16]. Эта гипотеза позволяет предположить, что участки постинфарктного кардиосклероза можно выявить, используя исключительно бесконтрастные изображения МРТ сердца в кино-режиме, сведя к минимуму побочные эффекты от введения гадолиний-содержащих препаратов и значительно снизив стоимость и время исследования. Согласно опубликованным данным, подобные исследования у пациентов с ИКМП не проводились.

Цель исследования: Оценить возможности и информативность радиомического анализа в выявлении постинфарктных областей миокарда ЛЖ у пациентов с ИКМП по данным бесконтрастных изображений МРТ сердца в кино-режиме.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Дизайн исследования

В данное наблюдательное одноцентровое ретроспективное выборочное неконтролируемое исследование включены пациенты обоего пола в возрасте от 52 до 65 лет, которым проводили хирургическое лечение ИКМП. Всем пациентам выполняли МРТ сердца с контрастированием по клиническим показаниям либо как часть научного протокола.

КРИТЕРИИ СООТВЕТСТВИЯ

В исследование включены пациенты, соответствующие стандартизованным критериям ИКМП [17]:

- 1) перенесённый ИМ в анамнезе;
- 2) многососудистое поражение коронарных артерий (выявленное по данным инвазивной коронароангиографии);
- 3) низкая ФВЛЖ — менее 40%;
- 4) повышенный конечно-систолический индекс (КСИ) — более 60 мл/м²;
- 5) сердечная недостаточность II–IV функционального класса по NYHA.

Не включали в исследование пациентов с пороками сердца инфекционного, ревматического генеза, пациентов с острым нарушением мозгового кровообращения и острой стадией ИМ, пациентов с наличием правожелудочковой недостаточности.

Для проведения исследования отобраны изображения МРТ сердца с контрастированием пациентов, перенёвших хирургическое лечение по поводу ИКМП за период с 2019 по 2023 г.

УСЛОВИЯ ПРОВЕДЕНИЯ

Набор пациентов осуществляли на базе Научно-исследовательского института кардиологии Томского национального исследовательского медицинского центра Российской академии наук.

В исследование включены пациенты, которым для оценки жизнеспособности миокарда проведено МРТ сердца с парамагнитным контрастным усилением (ПМКУ).

ОСНОВНОЙ ИСХОД ИССЛЕДОВАНИЯ

Суррогатной конечной точкой было различие значений радиомических показателей интактного миокарда и областей ПИКС на изображениях МРТ сердца в кино-режиме.

МЕТОДЫ РЕГИСТРАЦИИ ИСХОДОВ

МРТ сердца с контрастированием

В рамках исследования из медицинской документации пациентов собраны данные о проведенном для оценки жизнеспособности миокарда МРТ сердца с ПМКУ по стандартной методике на магнитно-резонансном томографе Vantage Titan (Toshiba) 1,5 Тл с ЭКГ-синхронизацией, синхронизацией по дыханию и получением изображений миокарда по короткой и длинным осям до и после введения гадолиний-содержащего контрастного препарата гадоутрола, в дозировке 0,1–0,15 ммоль/кг на массы тела пациента. Толщина срезов составляла 7–8 мм, с записью в матрицу 256×256. Протокол МРТ-исследования включал T1-, и T2-взвешенные последовательности, и последовательность с подавлением сигнала от жировой ткани для оценки состояния миокарда, динамические SSFP-последовательности для оценки объёмов и функции ЛЖ, градиентные последовательности инверсия–восстановление (GR–IR) для выявления участков патологического контрастирования. Время инверсии подбирали индивидуально (в среднем TI=300±10 мс). Оценку изменённых участков в миокарде проводили с учётом 17-сегментной системы топической характеристики миокарда ЛЖ. Основные параметры ЛЖ рассчитывали с использованием программы постпроцессинговой обработки Segment (version 2.2, Medviso AB).

Радиомический анализ

Текстурный анализ выполняли на основе бесконтрастных изображений МРТ сердца в кино-режиме. Все изображения сегментировали с использованием программного обеспечения 3D slicer (version 5.2.2), радиомические признаки извлекали автоматически с помощью расширения SlicerRadiomics (version aa418a5).

В дальнейшем проводили сравнение радиомических характеристик участков интактного миокарда с участками ПИКС на основе бесконтрастных изображений в кино-режиме.

Для определения различий в радиомических характеристиках интактного миокарда и областей постинфарктного кардиосклероза на кино-изображениях формировали зоны интереса, размер и локализация которых соответствовала областям постинфарктного кардиосклероза (ПИКС) и интактного миокарда по данным МРТ-изображений с отсроченным контрастированием. Последовательно выполняли следующие действия: вручную очерчивали области интереса на МРТ-срезах по короткой оси (в режиме SSFP), соответствующие областям ПИКС на постконтрастных МРТ-изображениях (ROI) → извлекали текстурные характеристики с использованием библиотеки Pyradiomics. Методика формирования зон интереса показана на [рис. 1](#).

Текстурному анализу подвергнуто 66 участков изображений МРТ сердца в кино-режиме, для каждого из которых определялось 105 текстурных характеристик, которые подразделяются на следующие классы:

- признаки первого порядка (Energy, Entropy, Range, Kurtosis и т.д.);
- характеристики формы, 3D (Mesh Volume, Voxel Volume, Sphericity и т.д.);
- характеристики формы, 2D (Perimeter, Pixel Surface, Elongation и т.д.);
- матрица совместного совпадения уровней серого (GLCM);
- матрица длины пробега на уровне серого (GLRLM);
- матрица размерных зон уровня серого (GLSZM);
- матрица различий соседних серых тонов (NGTDM);
- матрица зависимости уровней серого (GLDM).

ЭТИЧЕСКАЯ ЭКСПЕРТИЗА

Исследование выполнено в соответствии со стандартами надлежащей клинической практики (Good Clinical Practice) и принципами Хельсинкской Декларации. Все пациенты, включённые в исследование, подписывали информированное согласие на участие. Работа одобрена Комитетом по биомедицинской этике НИИ кардиологии Томского НИМЦ (протокол № 210 от 18 февраля 2021 г.).

СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

В ходе статистической обработки последовательно выполнены следующие действия: отбор значимых текстурных характеристик → построение диаграмм коллинеарности признаков → отбор признаков по важности → выполнение регрессии Lasso. Отбор признаков осуществлялся с помощью функций и методов `identify_collinear`, `identify_zero_importance`, `identify_low_importance`, `identify_single_unique`, `identify_all` на языке программирования Python. Размер выборки предварительно не рассчитывался.

РЕЗУЛЬТАТЫ

ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Характеристика исследуемой выборки

В исследование включены 33 пациента с ИКМП (94% — мужчины), средний возраст составил $58,3 \pm 5,7$ года. Стенокардию напряжения наблюдали у всех пациентов, при этом третий функциональный класс встречался чаще других (67%). Сердечную недостаточность также диагностировали у всех пациентов, максимальное количество принадлежало третьему классу (61%). Гипертоническую болезнь выявили в 85% случаев, при этом дислипидемию — в 73% случаев, сахарный диабет — в 24%. Клиническая характеристика пациентов приведена в табл. 1.

Магнитно-резонансная томография сердца с контрастированием

Согласно результатам МРТ сердца с контрастированием, ФВЛЖ ниже 40% выявили у всех пациентов. Масса миокарда и конечный систолический объём ЛЖ (КСИ) были выше нормы. На изображениях в отсроченную фазу контрастирования у всех пациентов выявили области патологического накопления контраста, что соответствует ПИКС; у 5 (15%) пациентов в проекции истончённой стенки ЛЖ выявлены тромботические массы; сферификацию полости ЛЖ наблюдали у 31 (94%) пациента. Данные МРТ сердца с контрастированием приведены в табл. 2.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Предобработка данных

Мы удалили столбцы и строки данных, в которых доля пропущенных значений была более 0,75. В остальных случаях пропущенные значения заменили средними по признаку.

Диаграммы коллинеарности признаков

Для поиска коллинеарных предикторов использовали метод `identify_collinear`. Данный метод для каждой пары коррелированных признаков определил один для удаления. В машинном обучении наличие признаков, которые с высокой степенью коррелируют между собой, приводит к снижению производительности обобщения данных из-за высокой дисперсии и меньшей интерпретируемости модели. Мы получили 33 радиомических признака с коэффициентом корреляции больше 0,98. Для визуального представления коллинеарности признаков построены тепловые карты, в которых по вертикали представлены коррелируемые признаки, по горизонтали — признаки, подлежащие удалению (рис. 2, 3).

Признаки с нулевой важностью

Мы использовали функцию `identify_zero_importance`, чтобы выявить признаки с нулевой важностью. Определение и удаление таких признаков не влияет на информативность. Кроме того, с помощью функции `FeatureSelector` установили важность признаков, используя алгоритм градиентного бустинга. Показатель усреднялся по 10 тренировочным итерациям для уменьшения дисперсии. Использовали раннюю остановку с проверочным набором, чтобы предотвратить переобучение. На [рис. 4](#) представлены нормализованные показатели важности самых значимых признаков, по оси абсцисс отложена нормализованная важность признаков.

Мы оценили кумулятивную важность признаков в зависимости от их общего количества. Выяснили, что всего 27 признаков вносят свой вклад в общий вариационный ряд ([рис. 5](#)).

Признаки с низкой важностью

Метод выявления признаков с низкой важностью основан на предыдущем методе. Используя функцию `identify_low_importance`, определили параметры с наименьшей значимостью, которые не влияют на указанный общий уровень. Получили, что 27 признаков необходимы для суммарной важности 0,98, при этом 78 признаков не вносят дополнительного вклада в суммарную значимость.

Признаки с единственным значением

Метод выявления признаков с единственным значением отбирает все столбцы, которые содержат только одно значение. Такие признаки не могут быть полезны для машинного обучения, так как имеют нулевую дисперсию. Используя данный метод, мы не нашли функций с единственным уникальным значением ([рис. 6](#)).

С помощью логистической регрессии Lasso мы отобрали признаки и сформировали ROC-кривую ([рис. 7](#)). Точность обучения (training accuracy) и точность теста (test accuracy) составили 0,77 и 0,64 соответственно (Se=57,14%; Sp=71,43%).

ОБСУЖДЕНИЕ

Основной результат исследования

В данном исследовании мы изучили возможность использования радиомического анализа бесконтрастных МРТ-изображений сердца в кино-режиме для характеристики участков, соответствующих ПИКС и интактной стенке миокарда у пациентов с ИКМП. По данным проведённого нами исследования чувствительность и специфичность метода с помощью регрессии Lasso составила 57,14 и 71,43% соответственно. Представленные результаты подтверждают возможность дифференцировки рубцовых изменений миокарда и условно здоровой ткани, при этом относительно низкие значения чувствительности и специфичности, вероятнее всего, обусловлены небольшим объёмом выборки.

Обсуждение основного результата исследования

Полученные нами данные показывают, что радиомические признаки, извлечённые из изображений в кино-режиме, потенциально можно использовать для идентификации зон постинфарктных изменений, что может повысить точность выявления ИМ и снизить риски от введения гадолиний-содержащих контрастных препаратов. На сегодняшний день опубликованы единичные работы, посвящённые текстурному анализу бесконтрастных МРТ-изображений сердца в кино-режиме, при этом соответствующих исследований в группах пациентов с ИКМП мы не обнаружили.

Данные результаты согласуются с исследованием Smith и соавт., которое продемонстрировало значимость радиомических признаков на основе машинного обучения, извлечённых из бесконтрастных изображений МРТ сердца, для дифференцировки ИМ и нормальной ткани миокарда, что открывает новые возможности для клинической диагностики (AUC=0,88) [16]. В другом исследовании показано, что с помощью радиомического анализа бесконтрастных изображений МРТ сердца у пациентов с ИМ и подъёмом сегмента ST (ИМпST) можно оценивать неблагоприятное ремоделирование ЛЖ, тем самым повышая точность оценки и улучшая прогноз развития неблагоприятного ремоделирования ЛЖ (AUC=0,82) [18]. Более того, интеграция нативного T1-картирования и картирования внеклеточного объема в МРТ сердца вместе с радиомическим анализом повышает точность прогнозирования восстановления функции сердца и микрососудистых повреждений. Ma Q. и соавт. в своём исследовании показали, что радиомический анализ с использованием бесконтрастного T1-картирования может играть важную роль в диагностике острого ИМ и прогнозировании восстановления функции миокарда [19]. Этот метод не только повышает точность выявления микрососудистой обструкции, но и, как предполагают авторы, способен улучшить долгосрочный прогноз относительно сократительной функции миокарда. Кроме того, радиомика, основанная на нативном T1-картировании, способна предсказывать основные неблагоприятные сердечно-сосудистые события у пациентов с ИМпST,

облегчая стратификацию риска [20]. В своём исследовании В. Chen и соавт. показали, что текстурный анализ на основе данных картирования внеклеточного объёма может дифференцировать обратимые и необратимые повреждения миокарда у пациентов с ИМпST, прогнозируя неблагоприятное ремоделирование ЛЖ, что потенциально важно для клинического применения (AUC=0,91) [21]. В другом исследовании показано, что у пациентов с неишемической дилатационной кардиомиопатией радиомические характеристики, извлечённые из нативных изображений T1-картирования, позволяют предсказать риск неблагоприятного ремоделирования ЛЖ (AUC=0,81) [22]. Современные методики картирования перспективны в выявлении различных патологий миокарда, но на сегодняшний день доступность данных методик ограничена. Мы, в свою очередь, предлагаем способ получения дополнительной информации по данным бесконтрастных изображений МРТ сердца в кино-режиме, без использования картирования и контрастного усиления с приемлемой точностью (AUC=0,77).

В последние годы МРТ сердца стала золотым стандартом неинвазивной диагностики и комплексной оценки структурных изменений миокарда [23]. Помимо общепризнанной ценности динамических SSFP-последовательностей для оценки объёмов и функции ЛЖ, изображения с отсроченным контрастированием являются на сегодняшний день уникальным инструментом для выявления и расчёта протяжённости участков ПИКС. Хорошо известно, что объём повреждения, рассчитанный по данным отсроченного контрастирования, имеет решающее значение для прогнозирования ремоделирования ЛЖ [24]. При этом использование контрастных препаратов имеет определённые ограничения для отдельных групп пациентов: значительное количество постинфарктных пациентов клинически нестабильны на момент исследования и, как следствие, не могут переносить длительные процедуры; применение гадолиния может вызывать побочные эффекты, особенно ухудшать функцию почек у пациентов с почечной недостаточностью.

ОГРАНИЧЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Настоящее исследование имеет ряд ограничений. К таковым относятся, в первую очередь, ретроспективный характер и небольшой объём выборки; её необходимый размер для достижения требуемой статистической мощности результатов при планировании и проведении исследования не рассчитывался. В связи с этим выборка участников не может считаться в достаточной степени репрезентативной, что не позволяет экстраполировать полученные результаты и их интерпретацию на генеральную совокупность аналогичных пациентов за пределами исследования. Кроме того, не выполнена проверка информативности модели на верифицирующей выборке. Тем не менее на данной немногочисленной выборке нам удалось выявить значимые различия между интактной тканью и участками ПИКС по данным радиомического анализа изображений в кино-режиме.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Радиомический анализ бесконтрастных МРТ-изображений сердца в кино-режиме способен различать участки ПИКС и жизнеспособного миокарда и потенциально может быть использован в качестве метода, альтернативного отсроченному контрастированию у пациентов с ИМ. При этом, безусловно, требуется проведение дальнейших исследований на выборках большего объёма и создание модели с высокой прогностической эффективностью для стратификации пациентов с ИКМП и обеспечения поддержки принятия решений для ведения данных пациентов.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Источник финансирования. Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Вклад авторов. Все авторы подтверждают соответствие своего авторства международным критериям ICMJE (все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией). Наибольший вклад распределён следующим образом: А.С. Максимова — клиническая оценка участников исследования, сбор и анализ полученных данных, подготовка текста рукописи; Д.С. Саматов — анализ и интерпретация данных, редактирование рукописи; Б.С. Мерзликин — анализ и интерпретация данных, редактирование рукописи; Т.А. Шелковникова — клиническая оценка участников исследования, сбор и анализ полученных данных, редактирование рукописи;

А.И. Листратов — анализ и интерпретация данных; К.В. Завадовский — планирование и руководство исследованием, редактирование рукописи.

ADDITIONAL INFORMATION

Funding source. This study was not supported by any external sources of funding.

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

Authors' contribution. All authors made a substantial contribution to the conception of the work, acquisition, analysis, interpretation of data for the work, drafting and revising the work, final approval of the version to be published and agree to be accountable for all aspects of the work. A.S. Maksimova — planned research design, participated in clinical data collection, data analysis and interpretation and original draft preparation; D.S. Samatov — performed data analysis and interpretation and edited the manuscript; B.S. Merzlikin — performed data analysis and interpretation and edited the manuscript; T.A. Shelkovnikova — participated in clinical data collection, data analysis and interpretation and edited the manuscript; A.I. Listratov — performed data analysis and interpretation; K.V. Zavadovsky — planned research design, supervised the study, reviewed and edited the manuscript.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шальнова С.А., Драпкина О.М., Куценко В.А., и др. Инфаркт миокарда в популяции некоторых регионов России и его прогностическое значение // Российский кардиологический журнал. 2022. Т. 27, № 6. С. 4952. EDN: OCPROJ doi: 10.15829/1560-4071-2022-4952
2. Desai R., Mishra V., Chhina A.K., et al. Cardiovascular disease risk factors and outcomes of acute myocardial infarction in young adults: evidence from 2 nationwide cohorts in the United States a decade apart // Curr Probl Cardiol. 2023. Vol. 48, N 9. P. 101747. doi: 10.1016/j.cpcardiol.2023.101747
3. Martins-Marques T., Hausenloy D.J., Sluijter J.P., et al. Girao Intercellular communication in the heart: therapeutic opportunities for cardiac ischemia // Trends Mol. Med. 2021. Vol. 27, P. 248–262. doi: 10.1016/j.molmed.2020.10.002
4. Schuleri K.H., Centola M., Evers K.S., et al. Cardiovascular magnetic resonance characterization of peri-infarct zone remodeling following myocardial infarction // J Cardiovasc Magn Reson. 2012. Vol. 14, P. 24. doi: 10.1186/1532-429X-14-24
5. Bodi V., Monmeneu J.V., Ortiz-Perez J.T., et al. Prediction of Reverse Remodeling at Cardiac MR Imaging Soon after First ST-Segment-Elevation Myocardial Infarction: Results of a Large Prospective Registry // Radiology. 2016. Vol. 278, P. 54–63. doi: 10.1148/radiol.2015142674
6. Del Buono M.G., Garmendia C.M., Seropian I.M., et al. Heart Failure After ST-Elevation Myocardial Infarction: Beyond Left Ventricular Adverse Remodeling // Curr Probl Cardiol. 2022. Vol. 48, N 8. P. 101215. doi: 10.1016/j.cpcardiol.2022.101215
7. Ibanez B., Aletras A.H., Arai A.E., et al. Cardiac MRI Endpoints in Myocardial Infarction Experimental and Clinical Trials: JACC Scientific Expert Panel // J Am Coll Cardiol. 2019. Vol. 74, N 2. P. 238–256. doi: 10.1016/j.jacc.2019.05.024
8. Усов В.Ю., Бабокин В.Е., Мочула О.В., и др. Контрастированная магнитно-резонансная томография у пациентов с перенесенным инфарктом миокарда и предсердными тахикардиями // Сибирский журнал клинической и экспериментальной медицины. 2014. Т. 29, № 4. С. 33–38. EDN: TBFGPX doi: 10.29001/2073-8552-2014-29-4-33-38
9. Усов В.Ю., Вышлов Е.В., Мочула О.В., и др. МРТ с парамагнитным контрастным усилением в структурно-временной оценке повреждения миокарда при остром инфаркте и догоспитальной тромболитической терапии // Медицинская визуализация. 2018. Т. 22, № 2. С. 56–69. EDN: XMLLXN doi: 10.24835/1607-0763-2018-2-56-69
10. Kuo P.H., Kanal E., Abu-Alfa A.K., et al. Gadolinium-based MR contrast agents and nephrogenic systemic fibrosis // Radiology. 2007. Vol. 242, N 3. P. 647–649. doi: 10.1148/radiol.2423061640

11. Kim R.J., Wu E., Rafael A., et al. The use of contrast-enhanced magnetic resonance imaging to identify reversible myocardial dysfunction // *N Engl J Med*. 2000. Vol. 343, N 20. P. 1445–1453. doi: 10.1056/NEJM200011163432003
12. Kotu L.P., Engan K., Eftestol T., et al. Segmentation of scarred and non-scarred myocardium in LG enhanced CMR images using intensity-based textural analysis // *Annu Int Conf IEEE Eng Med Biol Soc*. 2011. P. 5698–5701. doi: 10.1109/IEMBS.2011.6091379
13. Larroza A., Lopez-Lereu M.P., Monmeneu J.V., et al. Texture analysis of cardiac cine magnetic resonance imaging to detect nonviable segments in patients with chronic myocardial infarction // *Med Phys*. 2018. Vol. 45, N 4. P. 1471–1480. doi: 10.1002/mp.12783
14. Максимова А.С., Усов В.Ю., Шелковникова Т.А., и др. Радиомический анализ магнитно-резонансных изображений сердца: обзор литературы // *Сибирский журнал клинической и экспериментальной медицины*. 2023. Т. 39, № 3. С. 13–22. EDN: RUADYI doi: 10.29001/2073-8552-2023-39-3-13-22
15. Larroza A., Materka A., Lopez-Lereu M.P., et al. Differentiation between acute and chronic myocardial infarction by means of texture analysis of late gadolinium enhancement and cine cardiac magnetic resonance imaging // *Eur J Radiol*. 2017. Vol. 92, P. 78–83. doi: 10.1016/j.ejrad.2017.04.024
16. Avard E., Shiri I., Hajianfar G., et al. Non-contrast Cine Cardiac Magnetic Resonance image radiomics features and machine learning algorithms for myocardial infarction detection // *Comput Biol Med*. 2022. Vol. 141, P. 105145. doi: 10.1016/j.compbimed
17. Felker G.M., Shaw L.K., O'Connor C.M. A standardized definition of ischemic cardiomyopathy for use in clinical research // *J Am Coll Cardiol*. 2002. Vol. 39, N 2. P. 210–208. doi: 10.1016/s0735-1097(01)01738-7
18. Liu M., Xin A., Chen T., et al. Non-contrast cine cardiac magnetic resonance derived-radiomics for the prediction of left ventricular adverse remodeling in patients with ST-segment elevation myocardial infarction // *Korean J Radiol*. 2023. Vol. 24, N 9. P. 827–837. doi: 10.3348/kjr.2023.0061
19. Ma Q., Ma Y., Yu T., et al. 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. Vol. 22, N 4. P. 535–546. doi: 10.3348/kjr.2019.0969
20. Ma Q., Ma Y., Wang X., et al. A radiomic nomogram for prediction of major adverse cardiac events in ST-segment elevation myocardial infarction // *Eur Radiol*. 2021. Vol. 31, N 2. P. 1140–1150. doi: 10.1007/s00330-020-07176-y
21. Chen B.H., An D.A., He J., 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. Vol. 31, N 1. P. 504–514. doi: 10.1007/s00330-020-07117-9
22. Chang S., Han K., Kwon Y., et al. T1 Map-based radiomics for prediction of left ventricular reverse remodeling in patients with non-ischemic dilated cardiomyopathy // *Korean J Radiol*. 2023. Vol. 24, P. 395–405. doi: 10.3348/kjr.2023.0065
23. Frederiksen H., Iorgoveanu C., Mahi A. State of the Art and New Advances: Cardiac MRI. *New Advances in Magnetic Resonance Imaging*. 2023. Available from: <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.112413>. Accessed: Apr 2, 2024. doi: 10.5772/intechopen.112413
24. Bodi V., Monmeneu J.V., Ortiz-Perez J.T., et al. Prediction of Reverse Remodeling at Cardiac MR Imaging Soon after First ST-Segment-Elevation Myocardial Infarction: Results of a Large Prospective Registry // *Radiology*. 2016. Vol. 278, N 1. P. 54–63. doi: 10.1148/radiol.2015142674

REFERENCES

1. Shalnova SA, Drapkina OM, Kutsenko VA, et al. Myocardial infarction in the population of some Russian regions and its prognostic value. *Russian Journal of Cardiology*. 2022;27(6):4952. EDN: OCPROJ doi: 10.15829/1560-4071-2022-4952
2. Desai R, Mishra V, Chhina AK, et al. Cardiovascular disease risk factors and outcomes of acute myocardial infarction in young adults: evidence from 2 nationwide cohorts in the United States a decade apart. *Curr Probl Cardiol*. 2023;48(9):101747. doi: 10.1016/j.cpcardiol.2023.101747
3. Martins-Marques T, Hausenloy DJ, Sluijter JP, et al. Girao Intercellular communication in the heart: therapeutic opportunities for cardiac ischemia. *Trends Mol Med*. 2021;27:248–262. doi: 10.1016/j.molmed.2020.10.002
4. Schuleri KH, Centola M, Evers KS, et al. Cardiovascular magnetic resonance characterization of peri-infarct zone remodeling following myocardial infarction. *J Cardiovasc Magn Reson*. 2012;14:24. doi: 10.1186/1532-429X-14-24
5. Bodi V, Monmeneu JV, Ortiz-Perez JT, et al. Prediction of Reverse Remodeling at Cardiac MR Imaging Soon after First ST-Segment-Elevation Myocardial Infarction: Results of a Large Prospective Registry. *Radiology*. 2016;278:54–63. doi: 10.1148/radiol.2015142674
6. Del Buono MG, Garmendia CM, Seropian IM, et al. Heart Failure After ST-Elevation Myocardial Infarction: Beyond Left Ventricular Adverse Remodeling. *Curr Probl Cardiol*. 2022;48(8):101215. doi: 10.1016/j.cpcardiol.2022.101215
7. Ibanez B, Aletras AH, Arai AE, et al. Cardiac MRI Endpoints in Myocardial Infarction Experimental and Clinical Trials: JACC Scientific Expert Panel. *J Am Coll Cardiol*. 2019;74(2):238–256. doi: 10.1016/j.jacc.2019.05.024
8. Ussov WYu, Babokin VE, Mochula OV, et al. Contrast-enhanced magnetic resonance tomography in patients with myocardial infarction and supraventricular tachyarrhythmias. *Siberian Journal of Clinical and Experimental Medicine*. 2014;29(4):33–38. EDN: TBFGPX doi: 10.29001/2073-8552-2014-29-4-33-38
9. Usov VYu, Vyshlov EV, Mochula OV, et al. Contrast-enhanced MRI in time-structure analysis of myocardial damage in acute infarction and early prehospital thrombolytic therapy. *Medical Visualization*. 2018;(2):56–69. EDN: XMLLN doi: 10.24835/1607-0763-2018-2-56-69
10. Kuo PH, Kanal E, Abu-Alfa AK, Cowper SE Gadolinium-based MR contrast agents and nephrogenic systemic fibrosis. *Radiology*. 2007;242(3):647–649. doi: 10.1148/radiol.2423061640
11. Kim RJ, Wu E, Rafael A, et al. The use of contrast-enhanced magnetic resonance imaging to identify reversible myocardial dysfunction. *N Engl J Med*. 2000;343(20):1445–1453. doi: 10.1056/NEJM200011163432003
12. Kotu LP, Engan K, Eftestol T, et al. Segmentation of scarred and non-scarred myocardium in LG enhanced CMR images using intensity-based textural analysis. *Annu Int Conf IEEE Eng Med Biol Soc*. 2011:5698–5701. doi: 10.1109/IEMBS.2011.6091379
13. Larroza A, Lopez-Lereu MP, Monmeneu JV, 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
14. Maksimova AS, Ussov WYu, Shelkovnikova TA, et al. Cardiac MRI Radiomics: review. *Siberian Journal of Clinical and Experimental Medicine*. 2023;38(3):13–22. EDN: RUADYI doi: 10.29001/2073-8552-2023-39-3-13-22
15. Larroza A, Materka A, Lopez-Lereu MP, et al. Differentiation between acute and chronic myocardial infarction by means of texture analysis of late gadolinium enhancement and cine cardiac magnetic resonance imaging. *Eur J Radiol*. 2017;92:78–83. doi: 10.1016/j.ejrad.2017.04.024
16. Avard E, Shiri I, Hajianfar G, et al. Non-contrast Cine Cardiac Magnetic Resonance image radiomics features and machine learning algorithms for myocardial infarction detection. *Comput Biol Med*. 2022;141:105145. doi: 10.1016/j.compbimed

17. Felker GM, Shaw LK, O'Connor CM A standardized definition of ischemic cardiomyopathy for use in clinical research. *J Am Coll Cardiol.* 2002;39(2):210–218. doi: 10.1016/s0735-1097(01)01738-7
18. Liu M, Xin A, Chen T, et al. Non-contrast cine cardiac magnetic resonance derived-radiomics for the prediction of left ventricular adverse remodeling in patients with ST-segment elevation myocardial infarction. *Korean J Radiol.* 2023;24(9):827–837. doi: 10.3348/kjr.2023.0061
19. Ma Q, Ma Y, Yu T, et al. 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):535–46. doi: 10.3348/kjr.2019.0969
20. Ma Q, Ma Y, Wang X, et al. A radiomic nomogram for prediction of major adverse cardiac events in ST-segment elevation myocardial infarction. *Eur Radiol.* 2021;31(2):1140–1150. doi: 10.1007/s00330-020-07176-y
21. Chen BH, An DA, He J, 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(1):504–514. doi: 10.1007/s00330-020-07117-9
22. Chang S, Han K, Kwon Y, et al. T1 Map-based radiomics for prediction of left ventricular reverse remodeling in patients with non-ischemic dilated cardiomyopathy. *Korean J Radiol.* 2023;24:395–405. doi: 10.3348/kjr.2023.0065
23. Frederiksen H, Iorgoveanu C, Mahi A. State of the Art and New Advances: Cardiac MRI. New Advances in Magnetic Resonance Imaging. 2023. Available from: <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.112413>. doi: 10.5772/intechopen.112413
24. Bodi V, Monmeneu JV, Ortiz-Perez JT, et al. Prediction of Reverse Remodeling at Cardiac MR Imaging Soon after First ST-Segment-Elevation Myocardial Infarction: Results of a Large Prospective Registry. *Radiology.* 2016;278(1):54–63. doi: 10.1148/radiol.2015142674

ОБ АВТОРАХ/ AUTHORS' INFO

Автор, ответственный за переписку:	
*Максимова Александра Сергеевна , канд. мед. наук; адрес: Россия, 634012, Томск, ул. Киевская 111а; ORCID: 0000-0002-4871-3283; eLibrary SPIN: 2879-9550; e-mail: asmximova@yandex.ru	*Aleksandra S. Maksimova , MD, Cand. Sci. (Med); address: 111a Kievskaya str., 634012, Tomsk, Russia; ORCID: 0000-0002-4871-3283; eLibrary SPIN: 2879-9550; e-mail: asmximova@yandex.ru
Соавторы	
Саматов Денис Сергеевич ; ORCID: 0009-0000-1821-323X; e-mail: denissamatov470@gmail.com	Denis S. Samatov ; ORCID: 0009-0000-1821-323X; e-mail: denissamatov470@gmail.com
Мерзликін Борис Сергеевич , канд. физ.-матем. наук; ORCID: 0000-0001-8545-9491; eLibrary SPIN: 4815-6169; e-mail: merzlikin@tpu.ru	Boris S. Merzlikin , Cand. Sci. (Physics and Mathematics); ORCID: 0000-0001-8545-9491; eLibrary SPIN: 4815-6169; e-mail: merzlikin@tpu.ru
Шелковникова Татьяна Александровна , канд. мед. наук; ORCID: 0000-0003-1367-5309; eLibrary SPIN: 1826-7850; e-mail: fflly@mail.ru	Tatyana A. Shelkovnikova , MD, Cand. Sci. (Medicine); ORCID: 0000-0003-1367-5309; eLibrary SPIN: 1826-7850; e-mail: fflly@mail.ru
Листратов Артём Игоревич ; ORCID: 0009-0004-3202-8179 e-mail: listrat312@gmail.com	Artem I. Listratov ; ORCID: 0009-0004-3202-8179 e-mail: listrat312@gmail.com
Завадовский Константин Валерьевич , д-р	Konstantin V. Zavadovsky , MD, Dr. Sci.

мед. наук; ORCID 0000-0002-1513-8614; eLibrary SPIN: 5081-3495; e-mail: konstz@cardio-tomsk.ru	(Medicine); ORCID 0000-0002-1513-8614; eLibrary SPIN: 5081-3495; e-mail: konstz@cardio-tomsk.ru
---	--

Accepted for publication

ТАБЛИЦЫ

Таблица 1. Клиническая характеристика пациентов

Показатель	Значение
Возраст, лет	58,3±5,7
Мужчины, n (%)	31 (94%)
ИМТ, кг/м ²	27,5±3,9
Гипертоническая болезнь в анамнезе, n (%)	28 (85%)
Функциональный класс сердечной недостаточности по NYHA, n (%):	
– I	0 (0%)
– II	12 (39%)
– III	20 (61%)
– IV	0 (0%)
Функциональный класс стенокардии напряжения, n (%):	
– I	1 (3%)
– II	10 (30%)
– III	22 (67%)
– IV	0 (0%)
Сахарный диабет, n (%)	8 (24%)
Дислипидемия, n (%)	24 (73%)

Примечание: ИМТ — индекс массы тела; NYHA (New York Heart Association) — Нью-Йоркская кардиологическая ассоциация.

Таблица 2. Данные магнитно-резонансной томографии сердца с контрастированием

Показатель	Значение
ФВЛЖ, %	31,5±7,5
КСИ, мл/м ²	79,7±16,7
ММЛЖ, г	190,8±2,1
МЖМ, г	140,8±30,05
Количество сегментов с трансмуральностью более 50%	4,4±2,6
Отношение массы миокарда, накопившего контрастный препарат, к ММЛЖ, %	27,1±6,9
Тромбоз, n (%)	5 (15)

Примечание: ФВЛЖ — фракция выброса левого желудочка; ММЛЖ — масса миокарда левого желудочка; МЖМ — масса жизнеспособного миокарда.

РИСУНКИ

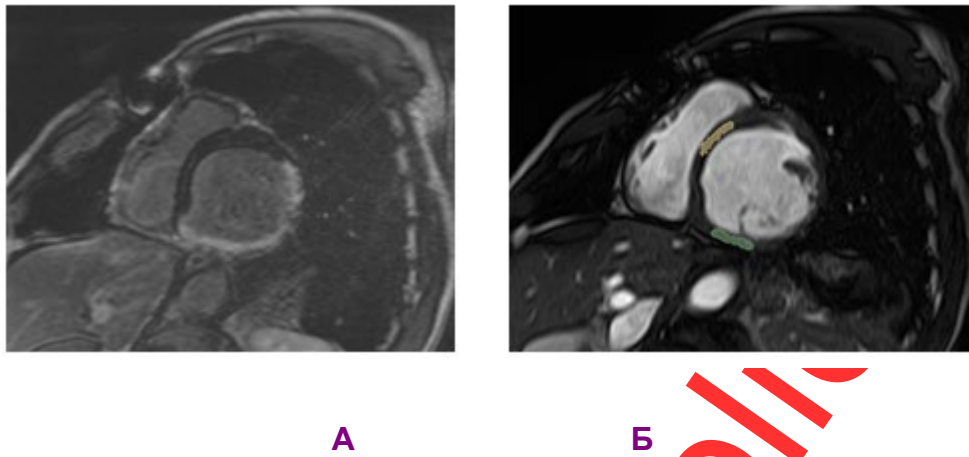


Рис. 1. Этапы формирования зон интереса на постконтрастных и бесконтрастных МРТ-изображениях сердца по короткой оси ЛЖ. А — МРТ с отсроченным контрастированием; по нижней стенке ЛЖ визуализируется трансмуральное накопление контрастного вещества, в области межжелудочковой перегородки ЛЖ данных за повреждение нет. Б — МРТ-изображение сердца в кино-режиме; сформированы зоны интереса в области задней стенки (зелёного цвета), что соответствует участку ПИКС нижнего сегмента среднего отдела ЛЖ, и в области переднеперегородочного сегмента среднего отдела (жёлтого цвета), что соответствует intactной межжелудочковой перегородке.

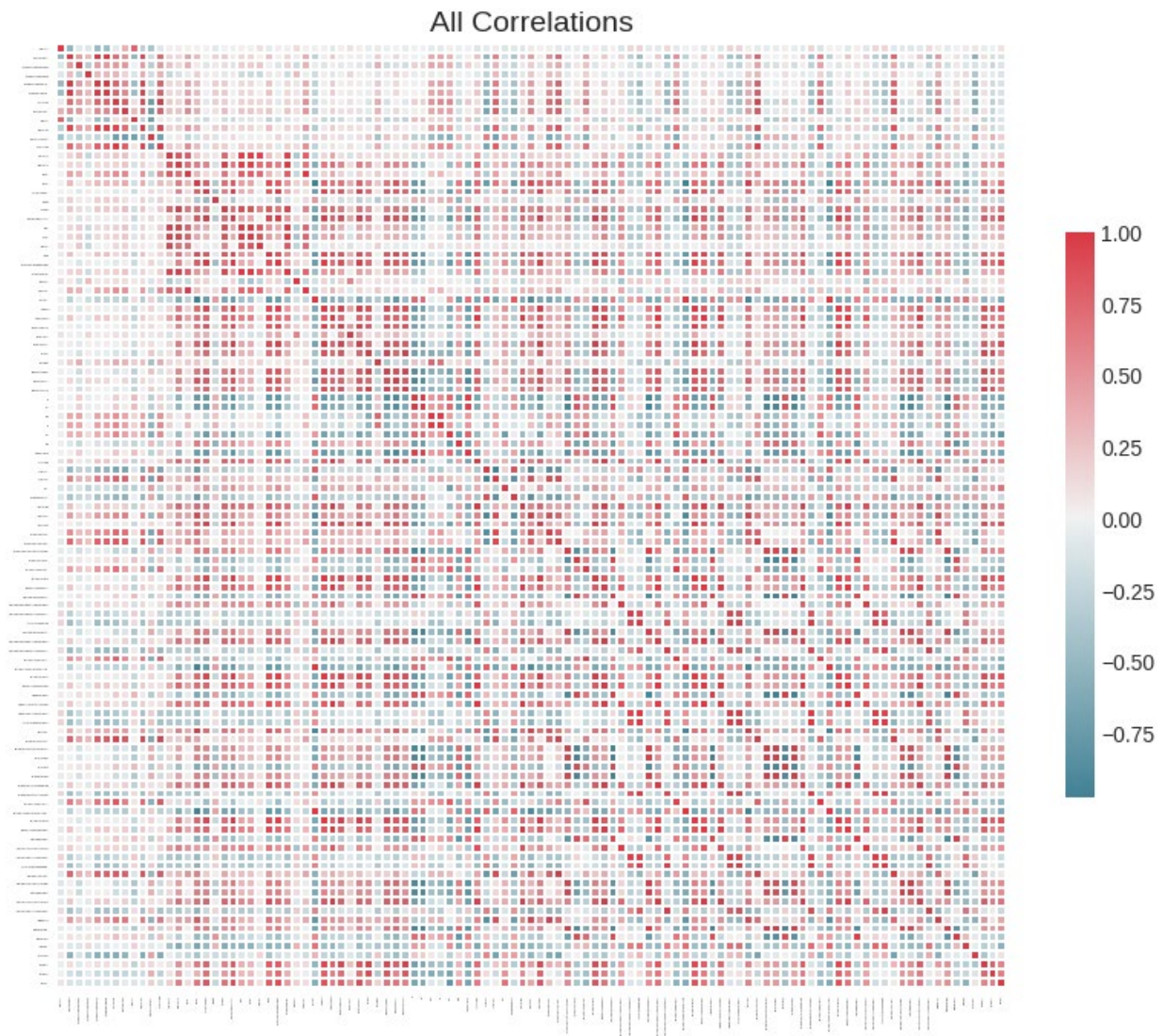


Рис. 2. Тепловая карта всех корреляций в наборе.

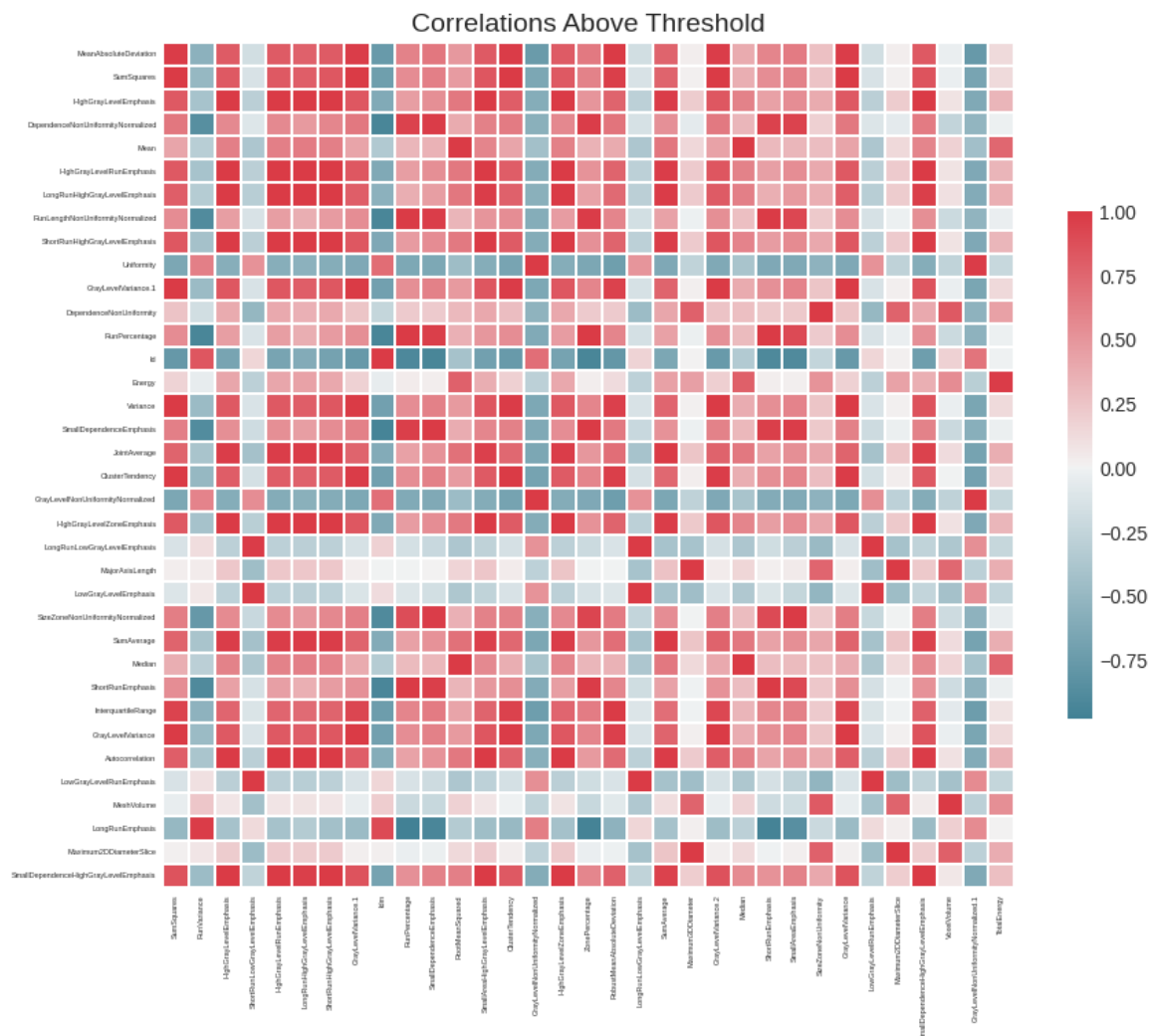


Рис. 3. Тепловая карта корреляции 33 признаков с коэффициентом корреляции более 0,98.

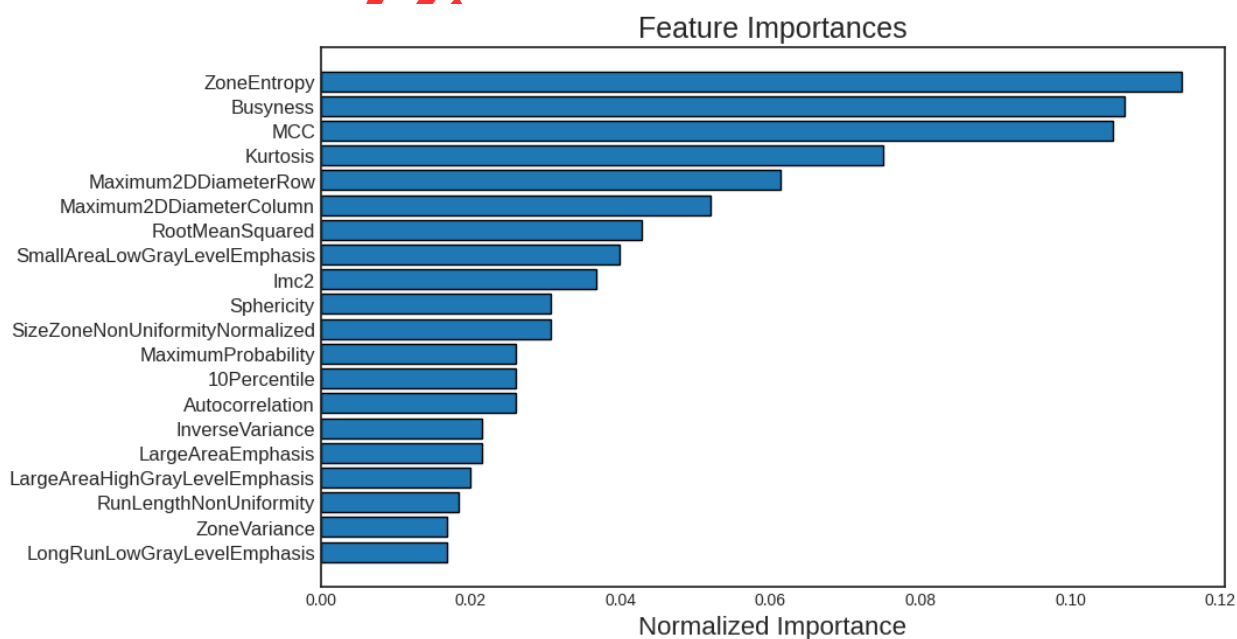


Рис. 4. Нормализованные показатели важности.

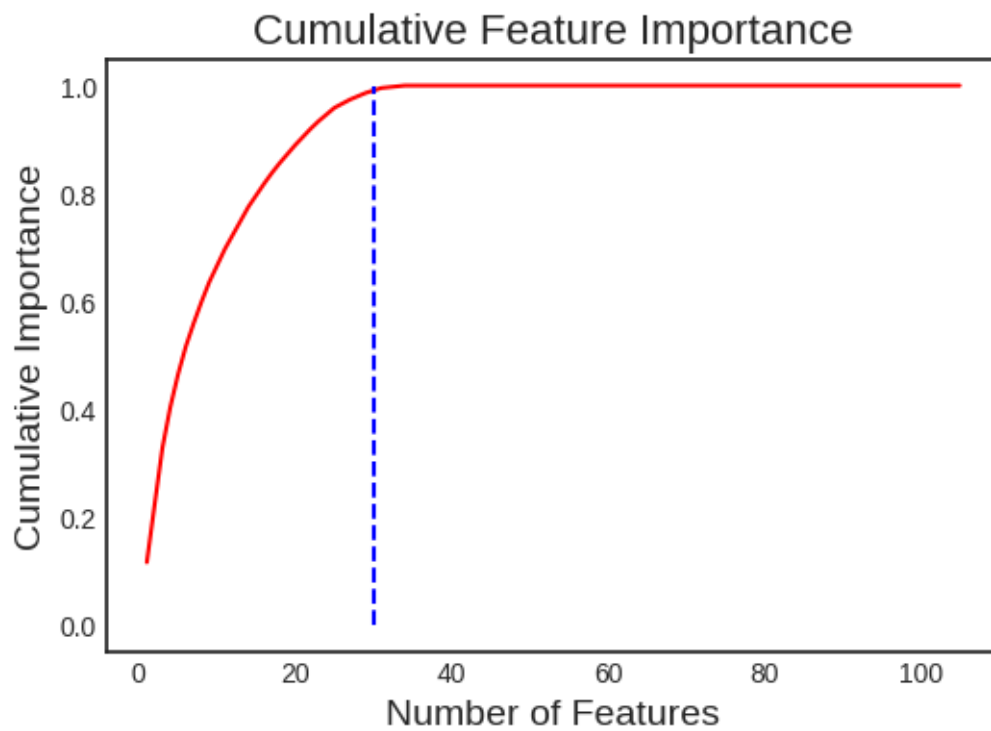


Рис. 5. Изменение кумулятивной важности признаков.

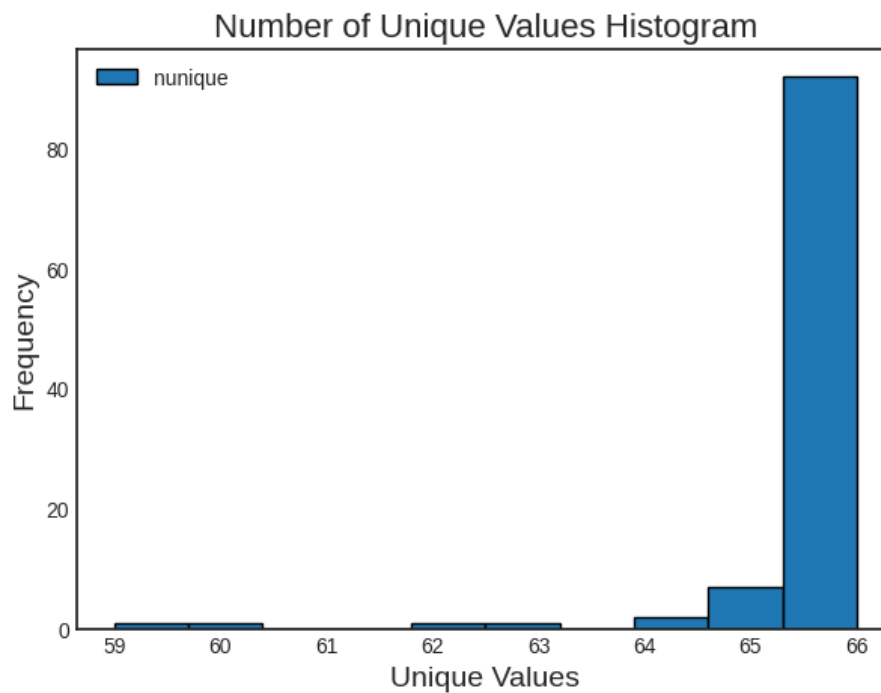


Рис. 6. Количество уникальных значений для каждого признака.

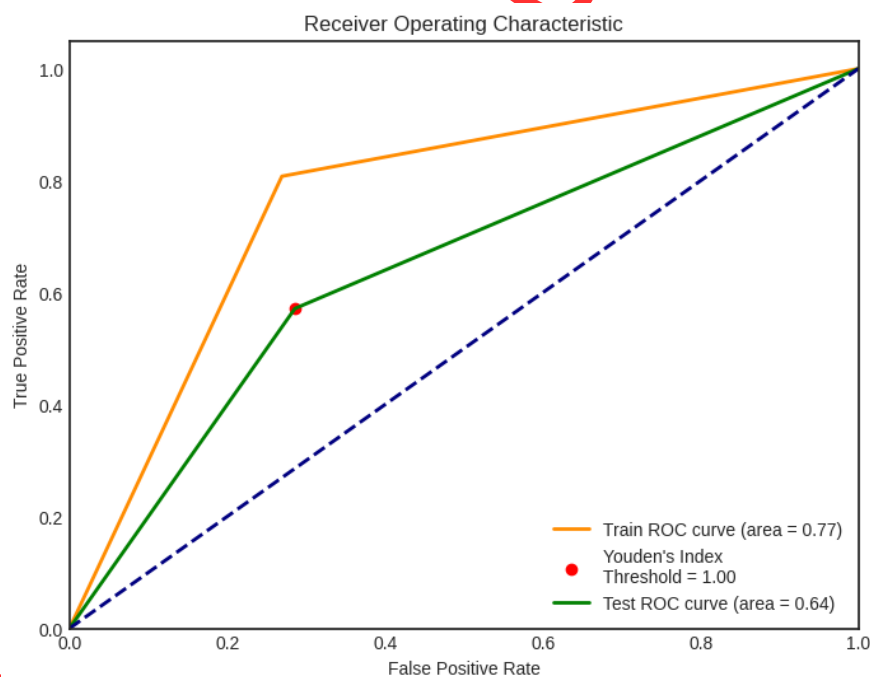


Рис. 7. ROC-кривые, показывающие точность обучения и точность тестирования (training accuracy AUC=0,77; test accuracy AUC=0,64).