

Возможности радиомики в интерпретации ультразвуковых и КТ-данных у пациентов с хронической болезнью почек

А.В. Проскура^{✉1}, Х.М. Исмаилов¹, А.Г. Смолеевский¹, А.И. Салпагарова¹, И.Н. Бобкова¹, А.М. Шестюк²

¹ФГАОУ ВО «Первый Московский государственный медицинский университет им. И.М. Сеченова» Минздрава России (Сеченовский Университет), Москва, Россия;

²УЗ «Брестская областная клиническая больница», Брест, Беларусь

Аннотация

Цель настоящего обзора – изучение возможностей радиомики в интерпретации данных ультразвукового исследования и мультиспиральной компьютерной томографии у пациентов с хронической болезнью почек (ХБП). Радиомика представляет собой перспективное направление анализа медицинских изображений, основанное на извлечении количественных признаков, не доступных при стандартном визуальном анализе, и последующем применении методов искусственного интеллекта для их обработки и интерпретации. В статье рассмотрены основы радиомических методов, включая текстурный анализ изображений и создание диагностических моделей с использованием алгоритмов машинного обучения. Подробно обсуждаются преимущества радиомических характеристик, в частности статистических признаков II порядка и более высоких порядков, в оценке интерстициального фиброза и других патологических изменений паренхимы почек. Приведены результаты исследований, демонстрирующие высокую степень корреляции радиомических признаков с гистологическими изменениями, выявленными при биопсии почек. Подчеркивается перспективность радиомики как неинвазивного подхода для оценки степени поражения почек и мониторинга прогрессирования ХБП. В заключении указана необходимость дальнейших исследований для стандартизации и расширения применения радиомических методов в клинической практике с целью повышения точности диагностики и улучшения прогностической оценки пациентов с ХБП.

Ключевые слова: радиомика, хроническая почечная недостаточность, фиброз, искусственный интеллект, система поддержки принятия врачебных решений

Для цитирования: Проскура А.В., Исмаилов Х.М., Смолеевский А.Г., Салпагарова А.И., Бобкова И.Н., Шестюк А.М. Возможности радиомики в интерпретации ультразвуковых и КТ-данных у пациентов с хронической болезнью почек. Терапевтический архив. 2025;97(6):503–508. DOI: 10.26442/00403660.2025.06.203259

© ООО «КОНСИЛИУМ МЕДИКУМ», 2025 г.

REVIEW

Radiomics capabilities in the interpretation of ultrasound and CT data in patients with chronic kidney disease: A review

Alexandra V. Proskura^{✉1}, Khalil M. Ismailov¹, Alexander G. Smoleevskiy¹, Amina I. Salpagarova¹, Irina N. Bobkova¹, Andrei M. Shestiuik²

¹Sechenov First Moscow State Medical University (Sechenov University), Moscow, Russia;

²Brest Regional Clinical Hospital, Brest, Belarus

Abstract

The purpose of this review is to explore the possibilities of radiomics in interpreting ultrasound and multislice spiral computed tomography data in patients with chronic kidney disease (CKD). Radiomics is a promising area of medical image analysis based on the extraction of quantitative features not available in standard visual analysis and the subsequent use of artificial intelligence methods for their processing and interpretation. The article discusses the basics of radiomic methods, including texture analysis of images and the creation of diagnostic models using machine learning algorithms. The advantages of radiomic characteristics, in particular statistical features of order II and higher orders, in assessing interstitial fibrosis and other abnormal changes in the renal parenchyma are discussed in detail. The results of studies demonstrating a strong correlation of radiomic signs with histological changes detected during kidney biopsy are presented. The prospects of radiomics as a non-invasive approach for assessing kidney damage and monitoring CKD progression are emphasized. The conclusion indicates the need for further research to standardize and expand the use of radiomic methods in clinical practice to improve the diagnosis accuracy and prognostic assessment of patients with CKD.

Keywords: radiomics, chronic renal failure, fibrosis, artificial intelligence, medical decision support system

For citation: Proskura AV, Ismailov KhM, Smoleevskiy AG, Salpagarova AI, Bobkova IN, Shestiuik AM. Radiomics capabilities in the interpretation of ultrasound and CT data in patients with chronic kidney disease: A review. *Terapevticheskii Arkhiv* (Ter. Arkh.). 2025;97(6):503–508. DOI: 10.26442/00403660.2025.06.203259

Информация об авторах / Information about the authors

✉ **Проскура Александра Владимировна** – канд. мед. наук, врач-уролог, онколог, ассистент Института урологии и репродуктивного здоровья человека ФГАОУ ВО «Первый МГМУ им. И.М. Сеченова» (Сеченовский Университет). E-mail: proskura_a_v_1@staff.sechenov.ru

Исмаилов Халил Микаилович – врач-уролог, аспирант Института урологии и репродуктивного здоровья человека ФГАОУ ВО «Первый МГМУ им. И.М. Сеченова» (Сеченовский Университет)

Смолеевский Александр Георгиевич – ординатор Института урологии и репродуктивного здоровья человека ФГАОУ ВО «Первый МГМУ им. И.М. Сеченова» (Сеченовский Университет)

✉ **Alexandra V. Proskura.** E-mail: proskura_a_v_1@staff.sechenov.ru; ORCID: 0000-0003-0441-4799

Khalil M. Ismailov. ORCID: 0000-0003-0548-190X

Alexander G. Smoleevskiy. ORCID: 0000-0002-8771-8589

Введение

Радиомика – новое направление в анализе медицинских данных, основанное на извлечении нескольких количественных признаков изображения, недоступных для выявления невооруженным глазом, с последующим поиском возможных корреляций этих признаков со специфическими клиническими конечными точками (например, морфологическими изменениями, ответом на лечение, выживаемостью и т.д.).

Применение радиомики в интерпретации ультразвуковых и КТ-данных у пациентов с ХБП

Радиомика используется в интерпретации данных ультразвукового исследования (УЗИ) и мультиспиральной (МСКТ) компьютерной томографии (КТ), в том числе у пациентов с хронической болезнью почек (ХБП).

После того как признаки/характеристики УЗИ/КТ/МСКТ или магнитно-резонансной томографии (МРТ) «собранны», как видно на **рис. 1**, они используются для машинного обучения с помощью искусственного интеллекта (ИИ).

После получения и реконструкции медицинских изображений область интереса (ROI – region of interest) сегментируется вручную, полуавтоматически или автоматически. Например, если ROI является почка, то ее контур должен быть «очерчен» на КТ-снимках каждого среза. Далее происходит извлечение интересующих признаков, в том числе с помощью ИИ, для выработки системы поддержки принятия клинических решений.

Другими словами, если мы говорим о заболеваниях почек, обучение заключается в «объяснении» компьютерной программе, как выглядит здоровая почка и почка с тем или иным заболеванием. После того как программа «обучена» на базовом уровне, в дальнейшем ей предлагаются «к освоению» более сложные радиомические признаки. Последние можно классифицировать на разные уровни, на статистику различного порядка в зависимости от методики их вычисления (**рис. 2**). Совокупность радиомических признаков формирует уникальный «рисунок» почки, или ее текстуру.

Видно, что 2 разных необработанных изображения имеют одинаковое количество черных, темно-серых, серых и светло-серых пикселей (элементарных частей изображения), при этом в статистике I порядка они же имеют одинаковые гистограммы, с одной стороны. С другой стороны, статистика II порядка и более высоких порядков учитывает горизонтальное «взаимоотношение» пикселей, что находит отражение в различных матрицах (3-й столбец на рисунке). Данный рисунок показывает, что статистика I порядка не принимает во внимание взаиморасположение пикселей, в то время как статистика II порядка и более высоких порядков учитывает горизонтальное, вертикальное и пространственное взаиморасположение пикселей, что

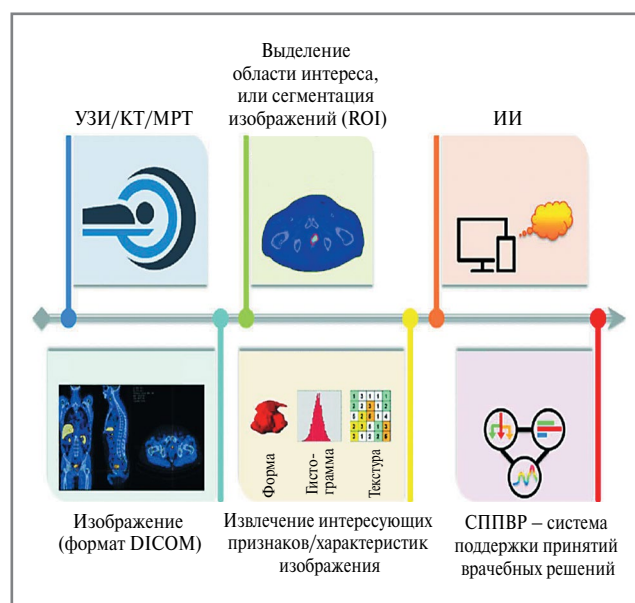


Рис. 1. Процесс создания изучаемой модели в радиомике [1].

Fig. 1. The process of creating a test model in radiomics [1].

лучше демонстрирует гетерогенность изучаемой структуры/ткани/органа и т.д.

Как видно из **рис. 2**, признаки I порядка представляют собой распределение значений пикселей без учета их пространственного распределения. Текстурные признаки II порядка и выше рассчитывают пространственные отношения между пикселями (элементарные квадраты изображения) с различным оттенком серого цвета.

Рассмотрим некоторые из них (матрицы), которые, как будет показано, могут быть использованы в текстовом анализе (анализе уникального «рисунка» ткани/органа – как в норме, так и при патологии):

- **GLCM** (Gray-Level Co-occurrence Matrix) – показывает, как часто различные комбинации серого цвета встречаются в изображении в различных плоскостях;
- **GLSZM** (Gray Level Size Zone Matrix) – показывает количество зон определенного размера с одним и тем же оттенком серого цвета;
- **GLRLM** (Gray Level Run Length Matrix) – отображает размеры однородных последовательностей для каждого оттенка серого цвета в заданном направлении;
- **GLDM** (Grey Level Dependence Matrix) – указывает на вероятность того, что 2 разных пикселя, расположенные в заданном положении от горизонтали и на одном расстоянии друг от друга, будут иметь одинаковый оттенок серого цвета;

Информация об авторах / Information about the authors

Салпагарова Амина Исламовна – студентка IV курса Института клинической медицины им. Н.В. Склифосовского ФГАОУ ВО «Первый МГМУ им. И.М. Сеченова» (Сеченовский Университет)

Бобкова Ирина Николаевна – д-р мед. наук, проф. каф. внутренних и профессиональных болезней и ревматологии Института клинической медицины им. Н.В. Склифосовского ФГАОУ ВО «Первый МГМУ им. И.М. Сеченова» (Сеченовский Университет)

Шестюк Андрей Михайлович – канд. мед. наук, доц., зав. отд-нием трансплантологии УЗ «Брестская ОКБ»

Amina I. Salpagarova. ORCID: 0009-0006-9642-7202

Irina N. Bobkova. ORCID: 0000-0002-8007-5680

Andrei M. Shestiuk. ORCID: 0000-0002-2624-5773

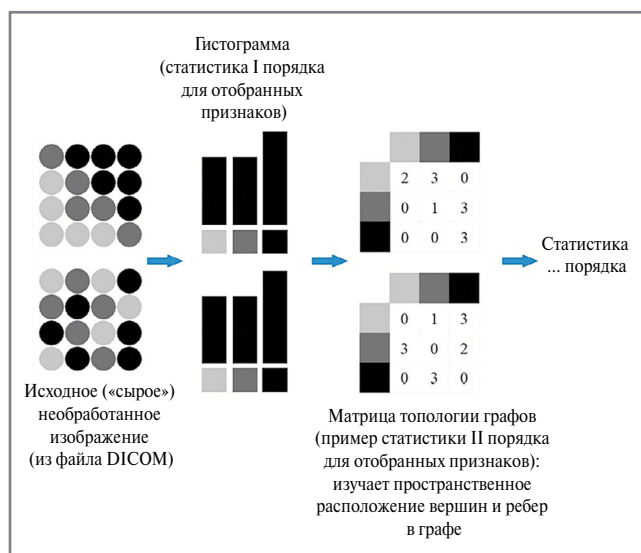


Рис. 2. Иллюстрация, сравнивающая возможности статистики I и II порядков [2].

Fig. 2. Illustration comparing the possibilities of statistics of the I and II orders [2].

- **NGTDM** (Neighbourhood Grey Tone Difference Matrix) – используется для измерения разницы в интенсивности серого цвета между соседними пикселями.

Поскольку группировка оттенков серого цвета по тому или иному признаку затруднительна для человеческого глаза, похожие признаки «серого» можно извлечь из изображений, преобразованных методом вейвлета (wavelet transform – WT) – посредством обучения нейронной сети. Данное преобразование «разбирает» изображение на составляющие – высокочастотные (H) и низкочастотные (L) фильтрованные изображения.

Относительно недавно предприняты попытки изучить возможности радиомики в анализе и обработке медицинских данных, например DICOM-изображений МСКТ. Особенный потенциал радиомики раскрыт в анализе подобных КТ-картин при онкологических заболеваниях различной локализации [3–5]. Большинство изменений, которые содержатся в изображениях, являются текстурными признаками высокого порядка, т.е. могут быть выявлены и проанализированы с помощью сложных методов статистики с использованием машинного обучения. Как показано, данные текстурные изменения не видны невооруженным глазом, но потенциально отражают микроструктурные изменения, которые в состоянии выявить нейронная сеть. Таким образом, радиомика может стать недостающим звеном в цепи, где соседними звеньями являются макроскопические описания органа/патологического процесса и соответствующие им не только микроструктурные изменения, но и молекулярные фенотипы [6]. Действительно, в последнее время появляется все больше публикаций, в которых строится о тесной взаимосвязи между гистологическим строением опухоли и ее радиомическими признаками текстуры [7–9]. В «неонкологическом» аспекте в серии работ представлено, что признаки текстуры тесно взаимосвязаны с наличием фиброза в таких органах, как, например, печень, легкие, кишечник [10–12]. Однако исследований, которые бы выявляли или сравнивали текстурные изменения с патоморфологическими, гораздо меньше – в «неонкологии» они единичны.

Гистологическое исследование биоптатов почечной паренхимы – важный инструмент в диагностике широкого спектра заболеваний почки, в особенности при длительно текущих хронических заболеваниях, которые морфологически могут проявляться в следующих изменениях: интерстициальный фиброз (ИФ), атрофия канальцев, гломерулосклероз (ГС), артериолосклероз. Индексация показателей фиброза уже используется в морфологической классификации, например при IgA-нефропатии (с накоплением комплексов иммуноглобулина А в клубочках), диабетической нефропатии, волчаночном нефрите, ANCA-ассоциированных васкулитах (с антинейтрофильными цитоплазматическими антителами в крови) [13, 14]. Шкала, характеризующая степень хронических изменений при том или ином заболевании почек, дает важную для прогноза информацию в дополнение к традиционным маркерам прогрессирования ХБП – уровню протеинурии, величине скорости клубочковой фильтрации (СКФ) [15]. Тем не менее биопсия почки – инвазивная манипуляция, которая может сопровождаться в том числе жизнеугрожающими осложнениями [16]. Таким образом, биопсия почки нередко проводится только тщательно отобранным пациентам после скрупулезной оценки пользы и риска от манипуляции. Серологические маркеры не всегда имеют высокую чувствительность и специфичность, а также стабильность концентрации с течением времени. Кроме того, некоторые из них являются применимыми только для данного конкретного заболевания почек и не могут представлять собой альтернативу биопсии органа [17, 18].

Современные методы визуализации, такие как МРТ, ультразвуковая эластография, демонстрируют высокую чувствительность в отношении диагностики ИФ [19, 20], однако часто они не валидированы и не стандартизированы в клинической практике. В основном это работы, посвященные изучению радиомических признаков на изображениях почек, полученных с помощью эхографии [21].

Характерной особенностью ХБП является почечный фиброз, при котором внеклеточный матрикс начинает накапливаться в значительном количестве, что приводит к образованию рубцов и утолщению тканей почек. В свою очередь, это вызывает гетерогенность их внешнего вида. Повышенная гетерогенность и жесткость тканей усиливают рассеивание ультразвукового сигнала, изменяя спекловые структуры (ультразвуковой «рисунок») по сравнению со здоровыми почками. Данные изменения в спекловых структурах могут быть количественно оценены с помощью ультразвуковых методов визуализации.

Тем не менее визуально различить здоровые и пораженные ХБП почки на изображениях в В-режиме трудно. Пожалуй, в единственном исследовании, посвященном ультразвуковым радиомическим признакам почки при ХБП, приняли участие 102 человека: 75 пациентов с клинически подтвержденной ХБП и 27 здоровых добровольцев [21]. Исключены пациенты с кистами, агенезией почек или почечными камнями. Средний возраст пациентов с ХБП составил 54 ± 10 лет, а здоровых добровольцев – 47 ± 8 лет. Для анализа ультразвуковых данных использовались изображения в формате DICOM. Изображения обеих почек получены без подавления спекл-шумов. В дальнейшем проводили сегментацию изображения, или выделение ROI. Для анализа характеристик кортикального слоя почки использовался коронарный срез. Изображения с неясным или очень тонким кортикальным слоем исключали из анализа. Всего собрано 224 ROI от пациентов с ХБП и 158 аналогичных областей у здоровых добровольцев. Затем выделялись прямоугольные ROI из кортикаль-

ного слоя почек. Для анализа текстурных характеристик применяли библиотеку Py-Radiomics, а итоговые данные обрабатывались с помощью языка программирования R. Радиомические признаки разделены на характеристики I и II порядка. Для классификации использовали такие алгоритмы машинного обучения, как алгоритм случайного леса (Random Forest) для выбора наиболее значимых радиомических характеристик, а также алгоритм опорных векторов (Support Vector Machine) для разделения здоровых и поврежденных почек. Ультразвуковой датчик поворачивали с шагом 15 градусов (по оси коронального среза), чтобы определить оптимальный угол для оценки изучаемого патологического процесса. Радиомические характеристики рассчитывали на каждом этапе ротации, чтобы установить наиболее эффективный угол для дифференциации здоровых и пораженных ХБП почек. Показано, что радиомические признаки, извлеченные из ультразвуковых изображений с использованием преобразования WT, способны эффективно отличать ткань здоровых почек и почек, пораженных ХБП. При этом наиболее значимым признаком оказался WT (LH) GRLN (Normalized Gray Level Run Length Non-uniformity – Нормализованная Неоднородность Длины Серий Уровней Серого). **Таким образом, радиомические признаки, основанные на преобразовании WT, особенно чувствительны к изменениям в текстуре почек, вызванным ИФ**, что делает их перспективными для диагностики и мониторинга фиброза в почках. В отношении оптимального положения ультразвукового датчика при проведении сканирования почки доказано, что самая высокая дифференцирующая способность признака WT (LH) GRLN достигнута при угле 90 градусов между длинной осью почки и направлением распространения ультразвука, что указывает на важность ориентации объекта при анализе текстурных характеристик.

В целом можно сказать, что способы машинного обучения, основанные на ИИ с использованием радиомических признаков, на данном этапе развития вопроса могут применяться для различения здоровых почек и пораженных ХБП. В данном случае **метод опорных векторов смог классифицировать пораженные ХБП и здоровые почки с достаточно высокой точностью (87,5%) и чувствительностью (100%)**.

Несмотря на неоспоримые преимущества (простоту, доступность, отсутствие лучевой нагрузки), УЗИ почек представляет собой во многом субъективный способ в сравнении с МСКТ, ввиду чего именно КТ видится предпочтительным диагностическим методом. Принимая во внимание тот факт, что МСКТ все чаще используется в клинической практике, «гисторадиологические» корреляции, основанные на радиомических признаках текстуры, могли бы стать неинвазивным методом в диагностике целого спектра заболеваний почек. Модели радиомики на основе КТ имеют преимущество в использовании трехмерных параметров, таких как объем, 3D-форма и 3D-текстура, которые недоступны в данных радиомики на основе УЗИ. Более того, изображения КТ предоставляют количественные данные в единицах Хаунсфилда, что позволяет проводить более воспроизводимый анализ.

В подтверждение сказанного приведем данные исследования Y. Choi и соавт., демонстрирующего анализ подобных корреляций у пациентов, которым за 1 нед до выполнения биопсии почки проведено МСКТ органов брюшной полости [22]. Обследованы 95 пациентов с ХБП. Средний возраст – 52 года, 55,8% – лица мужского пола, у 26,3% больных диагностирован сахарный диабет. Сред-

няя СКФ составила 67,8 мл/мин/1,73 м², а у 43 (45,2%) пациентов СКФ была менее 60 мл/мин/1,73 м². Пациенты, в морфологическом материале которых было менее 10 клубочков, а МСКТ выполнена с «шагом» более 5 мм, исключены из исследования. При биопсии почек выявлен широкий спектр патологии, включая IgA-нефропатию, фокальный сегментарный ГС, диабетическую нефропатию, ANCA-ассоциированный васкулит, болезнь минимальных изменений, мембранозную нефропатию, гипертонический нефроангиосклероз, тубулоинтерстициальный нефрит и некоторые другие. Морфологическое описание включало наличие или отсутствие ГС, ИФ, тубулярной атрофии (ТА), индекс хронизации (ИХ). Почечная ткань подвергалась стандартной обработке с использованием следующих красителей для световой микроскопии: гематоксилина и эозина, а также окраске по Шиффу, Массону, серебрению по Джонсу. Кроме того, выполнены иммунофлуоресцентная и электронная микроскопии ткани почек. В дальнейшем наличие или отсутствие ИФ, ТА и ГС описано с помощью полуколичественной шкалы. Например, 0 баллов начислено при отсутствии или минимальной выраженности (менее 10%) того или иного изменения, 1 балл соответствовал незначительным изменениям (10–25%), 2 – умеренным (26–50%), 3 – выраженным изменениям (более 50%). При оценке толщины интимы артериол 0 или 1 балл выставались при отсутствии или наличии указанного изменения соответственно. ИХ включал такие показатели, как ИФ, ТА и ГС. Шкала ИХ представлена баллами от 0 до 10. Изменения трактовали как минимальные при ИХ, соответствующем 0–1 баллу, как незначительные – при 2–4 баллах, умеренные – при 5–7 баллах, выраженные – 8 баллах и более.

С помощью PyRadiomics проведен отбор радиомических признаков, включая форму, текстуру I и высшего порядков. Всего в анализ включено 1226 радиомических признаков (17 признаков формы, 236 признаков I порядка и 973 высокопорядковых текстурных признака, включая 5 наиболее сильно коррелирующих – NGTDM, GLDM, GLSZM, GLCM и GLRLM). Извлеченные радиомические признаки объединены в несколько групп: признаки, отражающие изменения во всей паренхиме («общепаренхиматозные»), и те, которые наблюдались исключительно в корковом слое почки. В целом радиомические признаки (NGTDM, GLDM, GLSZM, GLCM и GLRLM), извлеченные из общего «массива» паренхимы («общепаренхиматозные»), показали более высокие корреляции с гистологическими изменениями ($R_s=0,36–0,42$) в сравнении с показателями, извлеченными только в корковом веществе ($R_s=0,24–0,38$). Корреляции «общепаренхиматозных» радиомических признаков с величиной ИХ были более существенными, чем с выраженностью ИФ, АТ и ГС. В то же время между степенью поражения почки и, например, ее максимальной длиной корреляция была относительно низкой. Коэффициенты корреляции для размера почки по длинной оси варьировали от -0,25 до -0,10. Кроме того, объем почки демонстрировал слабую взаимосвязь с наличием ИФ, атрофией канальцев и суммой баллов по шкале ИХ ($R_s=-0,20, -0,17$ и $-0,28$ соответственно). Наряду с этим установлена связь между наиболее значимыми радиометрическими признаками (GLCM и GLRLM) и степенью изменения вещества почки по данным гистологической полуколичественной шкалы (ИФ, ТА или ГС). Для наглядности созданы воксельные карты высокопорядковых текстурных признаков для лучшего понимания их пространственного распределения. С увеличением балла по полуколичественной шкале в паренхиме распределялось больше вокселей высокой интенсивности с особенно яркими сигналами по

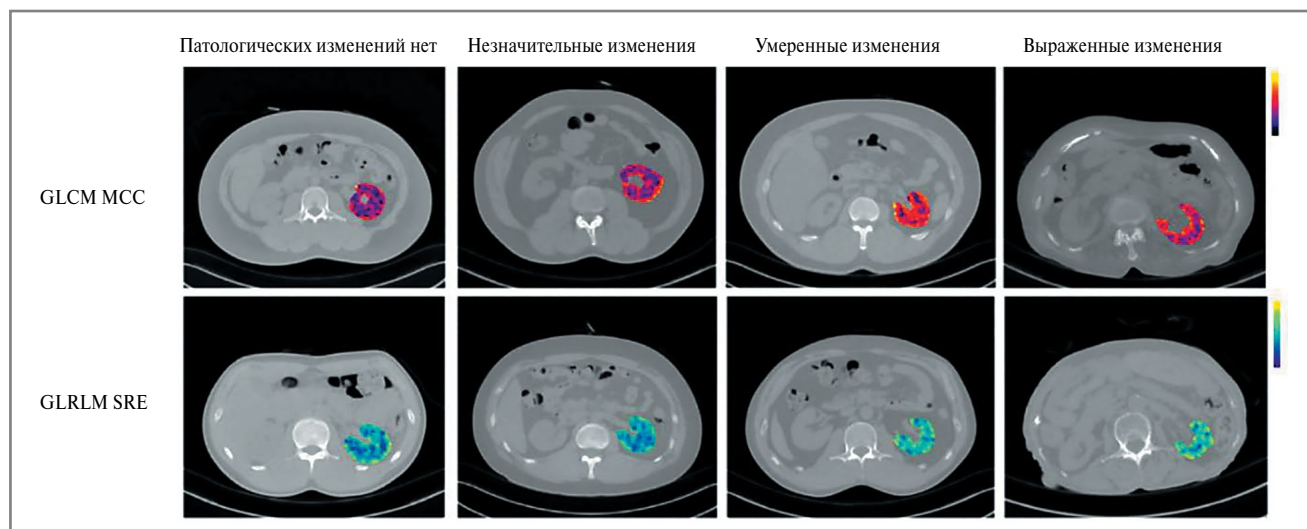


Рис. 3. Воксельная карта высокопорядковых текстурных признаков [22].

Fig. 3. Voxel map of high-order textural features [22].

наружному контуру почки (рис. 3), т.е. обнаружено, что текстурные признаки, сильно коррелирующие с хроническими поражениями, были интенсивно распределены вокруг краев почек на воксельных картах радиомики.

В данном исследовании высокопорядковые текстурные характеристики общего паренхиматозного ROI имели большую площадь под кривой (Area Under Curve), чем те, которые были извлечены только из кортикальной области почки. Таким образом, в этом исследовании у пациентов с ХБП впервые проанализированы морфорadiологические корреляции между радиомическими текстурными признаками на основе КТ и данными, обнаруженными при биопсии почки. Несколько высокопорядковых признаков хорошо коррелировали с фиброзными изменениями, такими как ИФ и ТА. Большинство повреждений из этих образцов состояли из текстурных признаков высокого порядка и демонстрировали лучшую различимость для почечного фиброза, чем ранее изученные радиологические признаки, полученные с помощью современных методов визуализации.

Помимо УЗИ и МСКТ существуют и другие методы визуализации для выявления очаговых изменений в органах, в частности МРТ. Последняя имеет ряд преимуществ: высокую контрастность мягких тканей, возможность получения изображений в любой плоскости, отсутствие дозовой нагрузки на пациента, применение более безопасных МР-контрастных средств по сравнению с йодсодержащими контрастными препаратами. В 90-х годах прошлого столетия получены первые диффузионно-взвешенные изображения паренхиматозных органов брюшной полости, включая почки, с помощью МРТ. Диффузионно-взвешенные изображения отражают свободное (броуновское) движение молекул воды в биологических тканях, на которые влияют клеточность ткани, целостность клеточных мембран, перфузия в микрокапиллярах, наличие очагов фиброза и т.д. В последние годы параметры визуализации, полученные с помощью МРТ, например измеряемый коэффициент диффузии при диффузионно-взвешенных изображениях, вызывают интерес как многообещающий способ анализа текстуры почек [20]. Вычисленные значения измеряемого коэффициента диффузии для каждого вокселя представляют в виде параметрической карты (ИКД-карты), кото-

рая, как правило, на МР-системах строится автоматически. Зарегистрированы достоверные корреляции между этими параметрами МРТ и ИФ в почках [23, 24]. Однако такие работы пока единичны, проведены на небольших выборках больных, что связано с высокой стоимостью исследования. Пожалуй, за исключением опухолей почек, возможности радиомики на основе МРТ остаются еще на начальном этапе развития.

Заключение

Отметим, что для дальнейшего изучения возможностей радиомики с целью интерпретации повреждения почек, неинвазивной оценки и мониторинга фиброза у пациентов с ХБП требуется инициация обширного числа исследований подобного направления, накопление большего объема информации об информативных высокопорядковых текстурных признаках и их возможных ассоциациях с гистологическими индексами.

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

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

Вклад авторов. Авторы декларируют соответствие своего авторства международным критериям ICMJE. Все авторы в равной степени участвовали в подготовке публикации: разработка концепции статьи, получение и анализ фактических данных, написание и редактирование текста статьи, проверка и утверждение текста статьи.

Authors' contribution. The authors declare the compliance of their authorship according to the international ICMJE criteria. 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.

Источник финансирования. Авторы декларируют отсутствие внешнего финансирования для проведения исследования и публикации статьи.

Funding source. The authors declare that there is no external funding for the exploration and analysis work.

Список сокращений

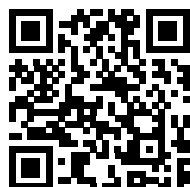
ГС – гломерулосклероз
 ИИ – искусственный интеллект
 ИФ – интерстициальный фиброз
 ИХ – индекс хронизации
 КТ – компьютерная томография
 МРТ – магнитно-резонансная томография
 МСКТ – мультиспиральная компьютерная томография
 СКФ – скорость клубочковой фильтрации
 ТА – тубулярная атрофия

УЗИ – ультразвуковое исследование
 ХБП – хроническая болезнь почек
 GLCM – Gray-Level Co-occurrence Matrix
 GLDM – Grey Level Dependence Matrix
 GLRLM – Gray Level Run Length Matrix
 GLSZM – Gray Level Size Zone Matrix
 NGTDM – Neighbourhood Grey Tone Difference Matrix
 ROI (region of interest) – область интереса
 WT (wavelet transform) – метод вейвлета

ЛИТЕРАТУРА/REFERENCES

- Pirrone G, Matrone F, Chiovati P, et al. Predicting local failure after partial prostate re-irradiation using a dosiomic-based machine learning model. *J Pers Med*. 2022;12(9):1491. DOI:10.3390/jpm12091491
- Miranda Magalhaes Santos JM, Clemente Oliveira B, Araujo-Filho JAB, et al. State-of-the-art in radiomics of hepatocellular carcinoma: A review of basic principles, applications, and limitations. *Abdominal Radiology (NY)*. 2020;45(2):342-53. DOI:10.1007/s00261-019-02299-3
- Shin J, Seo N, Baek SE, et al. MRI radiomics model predicts pathologic complete response of rectal cancer following chemoradiotherapy. *Radiology*. 2022;303(2):351-8. DOI:10.1148/radiol.211986
- Vicini S, Bortolotto C, Rengo M, et al. A narrative review on current imaging applications of artificial intelligence and radiomics in oncology: Focus on the three most common cancers. *Radiol Med*. 2022;127(8):819-36. DOI:10.1007/s11547-022-01512-6
- Wu L, Lou X, Kong N, et al. Can quantitative peritumoral CT radiomics features predict the prognosis of patients with non-small cell lung cancer? A systematic review. *Eur Radiol*. 2023;33(3):2105-17. DOI:10.1007/s00330-022-09174-8
- Tomaszewski MR, Gillies RJ. The biological meaning of radiomic features. *Radiology*. 2021;298(3):505-16. DOI:10.1148/radiol.202102553
- Li H, Gao L, Ma H, et al. Radiomics-based features for prediction of histological subtypes in Central Lung Cancer. *Front Oncol*. 2021;11:658887. DOI:10.3389/fonc.2021.658887
- Mukherjee P, Cintra M, Huang C, et al. CT-based radiomic signatures for predicting histopathologic features in head and neck squamous cell carcinoma. *Radiol Imaging Cancer*. 2020;2(3):e190039. DOI:10.1148/rycan.2020190039
- Wang M, Perucho JAU, Hu Y, et al. Computed Tomographic Radiomics in differentiating histologic subtypes of epithelial ovarian carcinoma. *JAMA Netw Open*. 2022;5(12):e2245141. DOI:10.1001/jamanetworkopen.2022.45141
- Park HJ, Lee SS, Park B, et al. Radiomics analysis of gadoteric acid-enhanced MRI for staging liver fibrosis. *Radiology*. 2019;290(2):380-7. DOI:10.1148/radiol.2018181197
- Meng J, Luo Z, Chen Z, et al. Intestinal fibrosis classification in patients with Crohn's disease using CT enterography-based deep learning: Comparisons with radiomics and radiologists. *Eur Radiol*. 2022;32(12):8692-705. DOI:10.1007/s00330-022-08842-z
- Refaee T, Salahuddin Z, Frix AN, et al. Diagnosis of idiopathic pulmonary fibrosis in high-resolution computed tomography scans using a combination of handcrafted radiomics and deep learning. *Front Med (Lausanne)*. 2022;9:915243. DOI:10.3389/fmed.2022.915243
- Herzenberg AM, Fogo AB, Reich HN, et al. Validation of the Oxford classification of IgA nephropathy. *Kidney Int*. 2011;80(3):310-7. DOI:10.1038/ki.2011.126
- Tervaert TW, Mooyaart AL, Amann K, et al. Pathologic classification of diabetic nephropathy. *J Am Soc Nephrol*. 2010;21(4):556-63. DOI:10.1681/ASN.2010010010
- Srivastava A, Palsson R, Kaze AD, et al. The prognostic value of histopathologic lesions in native kidney biopsy specimens: results from the Boston kidney biopsy cohort study. *J Am Soc Nephrol*. 2018;29(8):2213-24. DOI:10.1681/ASN.2017121260
- Canetta PA, Khairallah P, Kiryluk K, et al. Systematic review and meta-analysis of native kidney biopsy complications. *Clin J Am Soc Nephrol*. 2020;15(11):1595-602. DOI:10.2215/CJN.04710420
- Barinotti A, Radin M, Cecchi I, et al. Serum biomarkers of renal fibrosis: A systematic review. *Int J Mol Sci*. 2022;23(22):14139. DOI:10.3390/ijms232214139
- Huang E, Mengel M, Clahsen-van Groningen MC, Jackson AM. Diagnostic potential of minimally invasive biomarkers: A biopsy-centered viewpoint from the Banff Minimally Invasive Diagnostics Working Group. *Transplantation*. 2023;107(1):45-52. DOI:10.1097/TP.0000000000004339
- Ce M, Felisaz PF, Ali M, et al. Ultrasound elastography in chronic kidney disease: A systematic review and meta-analysis. *J Med Ultrason (2001)*. 2023;50(3):381-415. DOI:10.1007/s10396-023-01304-z
- Buchanan CE, Mahmoud H, Cox EF, et al. Quantitative assessment of renal structural and functional changes in chronic kidney disease using multi-parametric magnetic resonance imaging. *Nephrol Dial Transpl*. 2020;35(6):955-64. DOI:10.1093/ndt/gfz129
- Bandara MS, Gurunayaka B, Lakraj G, et al. Ultrasound based radiomics features of chronic kidney disease. *Acad Radiol*. 2022;29(2):229-35. DOI:10.1016/j.acra.2021.01.006
- Choi YH, Kim JE, Lee RW, et al. Histopathological correlations of CT-based radiomics imaging biomarkers in native kidney biopsy. *BMC Medical Imaging*. 2024;24(1):256. DOI:10.1186/s12880-024-01434-x
- Beck-Töilly A, Eder M, Beitzke D, et al. Magnetic resonance imaging for evaluation of interstitial fibrosis in kidney allografts. *Transplant Direct*. 2020;6(8):e577. DOI:10.1097/TXD.0000000000001009
- Berchtold L, Crowe LA, Combescure C, et al. Diffusion-magnetic resonance imaging predicts decline of kidney function in chronic kidney disease and in patients with a kidney allograft. *Kidney Int*. 2022;101(4):804-13. DOI:10.1016/j.kint.2021.12.014

Статья поступила в редакцию / The article received: 14.03.2025



OMNIDOCTOR.RU