

Возможности текстурного анализа лучевых методов визуализации в диагностике образований паренхимы почки

Д.Н. Гордуладзе¹, Е.С. Сирота^{1,2}, Л.М. Рапопорт¹, В.Н. Гридин², Д.Г. Цариченко¹, И.А. Кузнецов², П.В. Бочкарев², Ю.Г. Аляев¹

¹Институт урологии и репродуктивного здоровья человека ФГАОУ ВО Первый Московский государственный медицинский университет им. И.М. Сеченова Минздрава России (Сеченовский Университет); Россия, 119435 Москва, ул. Большая Пироговская, 2, стр. 1;

²ФГБУН «Центр информационных технологий в проектировании Российской академии наук»; Россия, 143003 Одинцово, ул. Маршала Бирюзова, 7а

Контакты: Евгений Сергеевич Сирота essirota@mail.ru

В настоящем обзоре изложены основные направления текстурного анализа в лечении пациентов с образованиями паренхимы почки, используемые в современной медицине. Представлены возможности применения радиомики в диагностике и лечении больных с почечно-клеточным раком.

Ключевые слова: текстурный анализ, машинное обучение, радиомика, 5П-медицина, мультиспиральная компьютерная томография, магнитно-резонансная томография, опухоль почки

Для цитирования: Гордуладзе Д.Н., Сирота Е.С., Рапопорт Л.М. и др. Возможности текстурного анализа лучевых методов визуализации в диагностике образований паренхимы почки. Онкоурология 2021;17(4):129–35. DOI: 10.17650/1726-9776-2021-17-4-129-135.

Prospects of texture analysis in radiological imaging for diagnosis of renal parenchyma tumor

D.N. Gorduladze¹, E.S. Sirota^{1,2}, L.M. Rapoport¹, V.N. Gridin², D.G. Tsarichenko¹, I.A. Kuznetsov², P.V. Bochkaryov², Yu.G. Alyaev¹

¹Institute of Urology and Human Reproductive Health, I.M. Sechenov First Moscow State Medical University, Ministry of Health of Russia (Sechenov University); Build. 1, 2 Bol'shaya Pirogovskaya St., Moscow 119435, Russia;

²Design Information Technologies Center, Russian Academy of Sciences; 7a Marshla Biryuzova St., Odintsovo 143000, Russia

Contacts: Evgeniy Sergeevich Sirota essirota@mail.ru

This review outlines current trends in applying texture analysis for the treatment of patients with renal parenchyma tumor. The prospects of using radiomics in the diagnosis and treatment of patients with renal cell carcinoma are presented.

Key words: texture analysis, machine learning, radiomics, 5P medicine, multispiral computed tomography, magnetic resonance imaging, renal tumor

For citation: Gorduladze D.N., Sirota E.S., Rapoport L.M. et al. Prospects of texture analysis in radiological imaging for diagnosis of renal parenchyma tumor. Onkourologiya = Cancer Urology 2021;17(4):129–35. (In Russ.). DOI: 10.17650/1726-9776-2021-17-4-129-135.

В современном мире невозможно представить повседневную жизнь без компьютеров. Цифровые технологии широко применяются во всех сферах жизнедеятельности человека. В медицине компьютерные технологии за последние десятилетия прочно заняли

1-е место в решении многих диагностических и лечебных задач.

На сегодняшний день большинство специальностей в здравоохранении не могут обходиться без высокотехнологичных методов диагностики, которые

в значительной степени способствуют выявлению многих заболеваний на ранних стадиях. Впервые возможность получения изображений человеческого тела стала реальной после открытия, которое в 1895 г. совершил немецкий физик, лауреат Нобелевской премии Вильгельм Конрад Рентген. Он описал «X-лучи» в научной статье, к которой в качестве иллюстрации прикрепил рентгенограмму кисти жены с обручальным кольцом [1].

Следующим важным этапом в развитии методов визуализации стало изобретение компьютерной томографии (КТ) в 1972 г., за которое английский инженер-физик Годфри Хаунсфилд и американский физик Аллан Кормак были удостоены Нобелевской премии. В 1992 г. появились первые мультиспиральные компьютерные томографы Elscint CT Twin фирмы Elscint Co [2].

Современные компьютерные томографы за счет использования нескольких рядов детекторов позволяют за более короткое время получить изображение тела человека и провести трехмерную реконструкцию интересующего органа, анатомической области.

Другим новым методом визуализации стала магнитно-резонансная томография (МРТ), разработанная американским химиком Paul C. Lauterbur и английским физиком Peter Mansfield, за это изобретение авторы были удостоены Нобелевской премии в области физиологии и медицины в 2003 г. [3].

Следующим этапом в совершенствовании визуализации является применение гибридного метода диагностики позитронно-эмиссионной компьютерной томографии (ПЭТ) с КТ (ПЭТ/КТ). В основе метода используется совмещение возможностей ядерной медицины и КТ. Посредством применения радиоактивных изотопов имеется возможность оценки не только анатомии, но и функции органов и систем организма.

Визуализирующая диагностика заболеваний человека по DICOM (Digital Imaging and Communications in Medicine) данным мультиспиральной компьютерной томографии (МСКТ), МРТ или ПЭТ/КТ в настоящее время выполняется на основе экспертной оценки врача лучевой диагностики.

Принимаемое специалистом заключение опирается на его практический опыт и знания. В своем заключении специалист использует небольшой объем объективно измеряемых параметров: размер патологического образования, топографо-анатомические взаимоотношения, количественные характеристики зоны интереса (ROI) среднее значение параметра (например, единицы Хаунсфилда (HU) при МСКТ, интенсивности сигнала (SI) при МРТ или стандартизированного значения поглощения (SUV) при ПЭТ), но эти параметры не отражают пространственного распределения данных характеристик.

Полная оценка количественных характеристик современных методов лучевой диагностики невозможна.

Двухмерное (2D) изображение объекта состоит из точек – пикселей. Трехмерное (3D) изображение формируют точки – воксели. Пиксел и воксел – минимальные единицы, элементы, из которых состоит изображение. Это точки определенного цвета, которые выводятся на экране в заданном месте.

Текстурный анализ – метод, который оценивает количественные характеристики неоднородности изображений, полученных посредством лучевых методов диагностики (ультразвукового исследования, МСКТ, МРТ, ПЭТ/КТ) [4]. Впервые основы физики текстурного анализа были изложены R.M. Haralick и соавт. в 1973 г. [5].

Физиологически текстура любого изображения воспринимается глазом человека как сложный узор, состоящий из пространственно организованных, повторяющихся картин, которые имеют характерный однородный внешний вид. Локальные узоры внутри целого изображения имеют определенную яркость, размер, шероховатость, направленность, случайность, гладкость, грануляцию и т. д.

Текстура изображения может нести существенную информацию о структуре физических объектов, так как анализ текстурных картин является важным вопросом в обработке и понимании полученного изображения.

Для анализа текстуры изображения используются методики интеллектуальной оценки данных посредством компьютерных программ с применением статистики (1-го, 2-го и высших порядков) и моделей (создание модели, характерной для определенного изображения), метод преобразования (начертательная геометрия – общее положение геометрической фигуры относительно плоскости проекции к частному) [4]. К извлекаемой статистике 1-го порядка относятся гистограммные показатели, которые описывают общее распределение элементов (пикселей/вокселей) в интересующей области: средняя интенсивность показывает среднее значение уровней серого в интересующей области; стандартное отклонение – величину, описывающую колебания уровня серого; энтропия – случайность в значениях уровня серого; коэффициенты эксцесса – меру остроты кривой распределения уровня серого; асимметрия – меру скошенности кривой распределения уровня серого. В отличие от них, показатели статистики 2-го порядка являются матричными, т. е. количественно описывают конкретные функции, встречающиеся в пределах заданной матрицы: показатели совместной встречаемости уровней серого – количество совместно встреченных пикселей/вокселей одного уровня серого и на одинаковом расстоянии под одинаковым углом; показатели длины пробега уровня серого – количество пробегов одинаковой длины и уровня серого в интересующей области вдоль определенного угла и др.

В медицине техника, основанная на интеллектуальной оценке данных с помощью цифровых технологий для анализа результатов лучевых методов визуализации, называется радиомикой [6]. При сочетании оценки текстуры больного с дополнительной информацией, такой как демографические, клинические, морфологические и геномные показатели, возможно получение фенотипа изображения персонализированно для каждого пациента. Другими словами, фенотип изображения – вид визуализируемой картины, характерный для определенного вида патологического образования в органах и тканях по морфологии, генотипу и своему биологическому потенциалу [6]. Особенную значимость оценка фенотипа изображения приобретает в лечении пациентов со злокачественными и доброкачественными новообразованиями.

Использование радиомики возможно для нескольких направлений в диагностике:

- установления вида образования (злокачественного или доброкачественного);
- определения морфологического варианта образований;
- оценки биологического потенциала опухоли (степени злокачественности новообразования);
- возможности определения мест для выполнения биопсии образований с учетом их гетерогенности;
- анализа эффективности проводимой лекарственной терапии рака [7].

Определение фенотипа изображения у пациентов с локализованными образованиями паренхимы почки на основании DICOM-данных лучевых методов визуализации (ультразвукового исследования, МСКТ, МРТ, ПЭТ/КТ) с использованием методов интеллектуального анализа является приоритетным направлением научных исследований в современной урологии. Поиск научных работ, в которых проводилось определение фенотипа изображения соответствует концепции развития мирового здравоохранения 5П-медицины [8]. Один из 5 принципов концепции 5П-медицины – прецизионность, для достижения которой применяется целый ряд медицинских технологий, направленных на сочетание максимальной эффективности лечения с минимальным воздействием на функции пациента и качество жизни, связанное со здоровьем.

Злокачественные и доброкачественные новообразования

Вопросы неинвазивной дифференциальной диагностики доброкачественных и злокачественных образований паренхимы почки являются приоритетными в определении тактики дальнейшего лечения больных. Особенно остро данный вопрос встает в последнее время. За счет совершенствования лучевых методов визуализации до 70 % образований паренхимы почки сегодня выявляются случайно на стадии T1a [9].

При этом морфологически 46 % образований размером ≤ 1 см и 20 % образований размером ≤ 4 см имеют доброкачественный характер [10].

За последние годы проведен ряд исследований, целью которых была оценка возможностей текстурного анализа для дифференциальной диагностики злокачественных и доброкачественных образований паренхимы почки [11–17].

В работе I. L. Xi и соавт. текстурному анализу подверглись результаты МРТ 1162 пациентов с образованиями паренхимы почки, с помощью глубокого машинного обучения были созданы прогностические модели с включением 94 характеристик текстуры и 79 клинических данных. Выполнена сравнительная оценка заключений 4 экспертов МРТ и прогностических моделей. В итоге точность (0,70 против 0,60; $p = 0,053$), чувствительность (0,92 против 0,80; $p = 0,017$) и специфичность (0,41 против 0,35; $p = 0,450$) моделей глубокого машинного обучения были сопоставимы с таковыми при экспертной оценке врачей лучевой диагностики прогноза установления доброкачественного или злокачественного характера образований паренхимы почки. На основании полученных результатов авторы пришли к выводу о том, что разработанные прогностические модели с использованием машинного обучения позволяют неинвазивно определять природу новообразований паренхимы почки по данным МРТ [17].

В работе С. Erdim и соавт. выполнялась оценка текстуры бесконтрастной и кортикомедуллярной фазы МСКТ 79 пациентов в режиме 2D с использованием 8 алгоритмов машинного обучения. В алгоритмы машинного обучения были включены 273 характеристики текстуры (гистограммные, градиентные и показатели различных матриц). Модель машинного обучения с алгоритмом «случайный лес» (random forest, RF) продемонстрировала лучшие показатели при текстурном анализе контрастированных фаз МСКТ с точностью 90,5 %, чувствительностью 95,2 % и специфичностью 76,2 % (площадь под ROC-кривой (AUC) 0,915). В заключении авторы отметили удовлетворительную производительность текстурного анализа с помощью машинного обучения кортикомедуллярных фаз МСКТ в неинвазивной диагностике доброкачественных и злокачественных образований паренхимы почки [16].

Совсем другой подход был использован в работе F.Y. Yur и соавт., в которой также исследовали возможности радиомического анализа с помощью алгоритма машинного обучения RF для дифференцировки доброкачественных и злокачественных новообразований. Текстура оценивалась по данным 3D-построений, выполненных на основании 735 МСКТ посредством программы Synapse 3D software (Fujifilm). Созданы 3 вида моделей: 1-я модель прогноза включала 760 текстурных показателей (гистограммных и показателей матрицы

совместной встречаемости уровня серого и др.); 2-я модель основывалась на 33 характеристиках формы образований паренхимы; 3-я модель объединяла характеристики текстуры и формы образований. При сравнении качества моделей прогноза наилучших результатов достигла модель с использованием данных текстуры и формы образований (AUC 0,68–0,75) [14].

Определение морфологии злокачественных образований паренхимы почки

Согласно Ванкуверской классификации в настоящее время по частоте верификации среди злокачественных образований паренхимы почки можно выделить 3 основных морфологических варианта почечно-клеточного рака (ПКР): светлоклеточный (80 %), папиллярный (14–16 %), хромофобный (4–8 %) [18]. Каждая морфологическая форма ПКР имеет свой онкологический прогноз. Худшие показатели 5-летней выживаемости отмечены при светлоклеточном ПКР (44–69 %), а также при папиллярном ПКР 2-го типа (66 %) [19]. В связи с этим наличие неинвазивной морфологической верификации формы ПКР имеет существенное значение на этапе планирования лечения в наблюдениях с локализованными образованиями паренхимы почки.

Так, в работе H.S. Yu и соавт. выполнялась оценка возможности применения текстурного анализа DICOM-данных паренхиматозной фазы МСКТ для дифференциальной диагностики морфологической принадлежности новообразований паренхимы почки. В ретроспективное исследование были включены 119 наблюдений (46 светлоклеточного ПКР, 41 папиллярного ПКР, 22 хромофобного ПКР, 10 онкоцитомы). Из анализа были исключены данные пациентов с редкими морфологическими вариантами ПКР, а также с ПКР с наличием саркоматоидной дифференцировки. Оценка гистограмм выполнена с использованием показателей статистики 1-го и 2-го порядков с применением машинного обучения. В результате значимой характеристикой текстуры для дифференциальной диагностики светлоклеточного ПКР и онкоцитомы было значение эксцесса и асимметрии (AUC 0,91 и 0,93; $p < 0,0001$), средние значения характеристик гистограммы позволяли дифференцировать папиллярный ПКР и онкоцитому (AUC 0,99; $p < 0,0001$) и помогали верифицировать онкоцитому от других форм ПКР (AUC 0,92). Применение машинного обучения позволило получить хорошие результаты в различении светлоклеточного и папиллярного ПКР от других морфологических форм (AUC 0,91 и 0,92 соответственно). В заключение авторы отметили, что текстурный анализ с использованием машинного обучения при дальнейшей разработке может стать биомаркером в дифференциальной диагностике морфологических форм локализованных образований паренхимы почки [20].

Похожие результаты были получены G.M. Y. Zhang и соавт., которые выполнили текстурный анализ 129 наблюдений кортикомедуллярной фазы МСКТ. Гистограммный анализ включал среднее значение интенсивности серого цвета, эксцесс, асимметрию, энтропию, стандартное отклонение (standard deviation, SD), среднее значение положительных пикселей (mean of positive pixels, MPP). В дальнейшем применены алгоритмы машинного обучения, в частности с использованием алгоритма опорных векторов (SVM), сформированы модели. Созданные прогностические модели проверены на точность и специфичность с помощью ROC-анализа. В модели с включением SD, энтропии, MPP и эксцесса показатель AUC составил $0,94 \pm 0$ с точностью 87 % (чувствительность 89 %, специфичность 92 %), что соответствует хорошему качеству для дифференцировки несветлоклеточного и светлоклеточного ПКР. Модель, включающая SD, MPP и асимметрию, продемонстрировала хорошее качество (AUC $0,96 \pm 0,04$ с точностью 78 % (чувствительность 87 %, специфичность 92 %)) для верификации папиллярного и хромофобного ПКР [21].

С учетом существенных различий в онкологическом прогнозе у пациентов с папиллярным ПКР 1-го и 2-го типов в мире выполнялись исследования по возможностям текстурного анализа таких наблюдений. В работе C. Duan и соавт. применяли радиомический анализ данных МСКТ для дифференцировки 1-го и 2-го типов папиллярного ПКР. Для анализа 809 характеристик текстуры 3 фаз МСКТ было использовано машинное обучение на основании алгоритма логистической регрессии Лассо (Lasso-LR), построены прогностические модели. Наилучший показатель точности 84 % (чувствительность 89 %, специфичность 80 %) отмечен в моделях с включением гистограммных характеристик всех 3 фаз МСКТ [22]. Текстурный анализ для морфологической неинвазивной диагностики может выполняться не только по DICOM-данным МСКТ, но и на основании результатов МРТ.

В исследовании W. Wang и соавт. радиомический анализ проведен по данным 77 наблюдений ПКР (32 светлоклеточного, 23 папиллярного, 22 хромофобного) с выполнением МРТ. Текстурному анализу были подвергнуты нефрографическая и кортикомедуллярная фазы T1- и T2-взвешенных изображений (ВИ). С использованием критерия Краскела–Уоллиса и порога дисперсии из 39 текстурных характеристик были отобраны статистически значимые характеристики с дальнейшим формированием моделей для каждой морфологической формы ПКР. Наилучшие результаты в дифференциальной диагностике показала модель, учитывающая все фазы T1-ВИ и T2-ВИ (для светлоклеточного и папиллярного ПКР точность 0,83, чувствительность 0,84, специфичность 0,87; для светлоклеточного и хромофобного ПКР точность 0,88,

чувствительность 0,84, специфичность 1,0; для папиллярного и хромофобного ПКР точность 0,88, чувствительность 0,87, специфичность 0,95) [23].

Оценка степени злокачественности новообразования

Значимым фактором в определении стратегии и тактики лечения пациентов с ПКР является степень ядерной дифференцировки клеток опухоли. В настоящее время в целях оценки степени ядерной анаплазии используются 2 шкалы. Первая – шкала Фурмана, в основе которой для определения ядерной дифференцировки заложены характеристики размера, формы и содержимого ядер клеток рака паренхимы почек [24]. Второй шкалой является система WHO/ISUP, в которой градация для первых 3 степеней основывается на уровне неровности, искажения текстуры, выпуклости (prominence) ядрышек, а 4-я отличается наличием выраженного плеоморфизма и саркоматоидной или рабдоидной дифференцировки [25]. Более высокие показатели степени ядерной анаплазии отражают большую степень биологической агрессивности опухоли и ассоциируются с низкой канцероспецифической выживаемостью пациента [26].

Текстурный анализ данных лучевых методов диагностики позволяет найти ответ на вопрос о степени дифференцировки клеток ПКР. В работе Z. Feng и соавт. оценивалась возможность градации степени злокачественности опухолей. Был проведен радиомический анализ контрастно усиленных в кортикомедулярную и нефрографическую фазы МСКТ 131 пациента. Статистическая обработка включала оценку гистограммных показателей: энтропии, стандартного отклонения, эксцесса, асимметрии, среднего значения интенсивности уровня серого. Для дифференциальной диагностики ПКР низкой (I–II по Фурману) и высокой (III–IV по Фурману) степени показатель энтропии оказался наиболее репрезентативным как в кортикомедулярную фазу (AUC 0,74, чувствительность 76 %, специфичность 65 %), так и в нефрографическую фазу (AUC 0,83, чувствительность 82 %, специфичность 77 %) [27]. Подобные результаты получили и Y. Deng и соавт., выполнившие текстурный анализ 298 наблюдений, предметом которого являлись изображения МСКТ с контрастированием в венозную фазу. В этом исследовании расчет показателей статистики 1-го порядка показал, что значение энтропии является наиболее ценным параметром в определении степени ядерной градации по Фурману (AUC 0,84; $p = 0,33$) [15].

Текстурный анализ для определения степени злокачественности ПКР возможен не только на основании данных МСКТ, но и по результатам МРТ. Так, в исследовании A. Goyal и соавт. выполнен текстурный анализ гистограммных показателей T1-ВИ, T2-ВИ, диффузионно-взвешенных изображений (DWI) и контрастно усиленных изображений МРТ 34 пациентов

с гистологически подтвержденным светлоклеточным ПКР. Проведены статистическая обработка и отбор наиболее ценных параметров (AUC >0,80; $p < 0,05$) для каждого режима МРТ. Следующие параметры оказались наиболее репрезентативными для дифференцировки ПКР низкой и высокой степени злокачественности: значение энтропии при режиме DWI (AUC 0,82, чувствительность 70 %, специфичность 90 %, точность 83 %), среднее значение интенсивности серого цвета (AUC 0,88, чувствительность 88 %, специфичность 100 %, точность 94 %) и среднее значение положительных пикселей (AUC 0,81, чувствительность 66 %, специфичность 100 %, точность 84 %), а также стандартное отклонение (AUC 0,80, чувствительность 90 %, специфичность 70 %, точность 80 %) при контрастировании в нефрографическую фазу [28].

Оценка проводимой лекарственной терапии метастатического почечно-клеточного рака

В клинической практике лечения пациентов с метастатическим ПКР оценка динамики выполняемой лекарственной терапии является важной составляющей, которая в конечном итоге определяет результат лечения. Кроме этого, выявление случаев с высоким риском неэффективности назначаемых схем лекарственных препаратов в зависимости от биологической природы клеток, составляющих злокачественное новообразование, позволяет персонализированно определять тактику лечения больных с метастатическим ПКР. В настоящее время для данных целей используются лучевые методы диагностики [29–31]. Также в мире проводился ряд исследований возможностей текстурного анализа для динамического контроля выполняемой лекарственной терапии метастатического ПКР.

В проспективном исследовании J. Antunes и соавт. 2 пациентам с метастатическим ПКР для мониторинга таргетной терапии выполнена визуализация ПЭТ/МРТ с ^{18}F -фтортимидином перед началом лечения и через 3 нед в ходе проводимой терапии ингибитором тирозинкиназы – сунитинибом. В ходе текстурного анализа извлечены 66 радиомических признаков текстуры. Выполнены статистическая обработка и анализ данных. Выявлено, что репрезентативными признаками, эффективно описывающими лекарственную терапию, являются SUV, значение энергии в режиме измеряемого коэффициента диффузии (apparent diffusion coefficient) и средняя разница интенсивности в режиме T2-ВИ. Авторы дали хорошую оценку текстурному анализу в мониторинге лекарственной терапии пациентов с метастатическим ПКР [32].

Основной особенностью рака любой локализации являются внутри- и межопухольевые гетерогенности, или неоднородности. Анализ фенотипа изображения пациента со злокачественным новообразованием позволяет прогнозировать течение патологического

процесса. Так, в ретроспективном исследовании V. Goh и соавт. выполнена оценка возможностей текстурного анализа МСКТ у 39 пациентов с метастатическим ПКР в ходе проведения химиотерапии в целях прогноза прогрессирования заболевания. При текстурном анализе извлечены абсолютные величины энтропии и однородности изображений метастатических образований перед началом терапии ингибиторами тирозинкиназы и в динамике после выполнения 2 циклов лечения в процентном отношении. Проведен сравнительный анализ прогноза прогрессирования метастатического ПКР методом Каплана–Майера между показателями текстурного анализа и стандартными критериями оценки ответа солидных опухолей (RECIST). Установлено, что показатели прогноза прогрессирования на основании данных текстурного анализа превосходят стандартные критерии оценки ответа солидных опухолей RECIST: $p = 0,008$ vs $p = 0,267$, $p = 0,053$ и $p = 0,042$. Кроме этого, при выполнении регрессивного анализа Кокса выявлено, что однородность изображения является независимым предиктором времени наступления

прогрессии новообразований (отношение шансов 4,02; 95 % доверительный интервал 1,52–10,65; $p = 0,005$) [33]. Получаемые знания прогноза позволяют определить объем необходимого лечения для каждого больного персонализированно.

Представленные возможности текстурного анализа методов лучевой диагностики в наблюдениях с образованиями паренхимы почки позволяют получать объективную оценку изображений в виде определения фенотипа.

Неинвазивная верификация морфологической природы образований способствует прецизионному походу к определению тактики терапии больных с новообразованиями. Определение опухолевой гетерогенности отражает биологический потенциал злокачественного новообразования и является значимым рабочим инструментом в руках врача в целях прогноза эффективности планируемой и осуществляемой терапии у пациентов с ПКР. Перечисленные возможности использования радиомики в конечном итоге помогают улучшить результаты лечения пациентов с новообразованиями паренхимы почки.

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Wilhelm Konrad Roentgen-The Centennial of His Birth-Semicentennial of the X-Rays. *JAMA* 2020;323(15):1512. DOI: 10.1001/jama.2019.13400.
2. Hounsfield G.N. Computerized transverse axial scanning (tomography): Part I. Description of system 1975. *Br J Radiol* 1973;68(815):H166–72.
3. Pincock S. US and UK researchers share Nobel prize. Paul C. Lauterbur and Peter Mansfield share award for seminal work on MRI. *Lancet* 2003;362(9391):1203. DOI: 10.1016/S0140-6736(03)14557-6.
4. Davnall F., Yip C.S.P., Ljungqvist G. et al. Assessment of tumor heterogeneity: an emerging imaging tool for clinical practice? *Insights Imaging* 2012;3(6):573–89. DOI: 10.1007/s13244-012-0196-6.
5. Haralick R.M., Shanmugam K., Dinstein I. Textural features for image classification. *IEEE Trans Syst Man Cybern* 1973;SMC-3(6):610–21. DOI: 10.1109/TSMC.1973.4309314.
6. Aerts H.J.W.L. The potential of radiomic-based phenotyping in precision medicine a review. *JAMA Oncol* 2016;2(12):1636–42. DOI: 10.1001/jamaoncol.2016.2631.
7. Lubner M.G., Smith A.D., Sandrasegaran K. et al. CT Texture Analysis: Definitions, Applications, Biologic Correlates, and Challenges. *Radiographics* 2017;37(5):1483–503. DOI: 10.1148/rg.2017170056.
8. Blobel B., Ruotsalainen P., Brochhausen M. et al. Autonomous systems and artificial intelligence in healthcare transformation to 5p medicine – ethical challenges. *Stu Health Technol Inform* 2020;270:1089–93. DOI: 10.3233/SHTI200330.
9. DeCastro G.J., McKiernan J.M. Epidemiology, clinical staging, and presentation of renal cell carcinoma. *Urol Clin North Am* 2008;35(4):581–92. DOI: 10.1016/j.ucl.2008.07.005.
10. Frank I., Blute M.L., Chevillat J.C. et al. Solid renal tumors: an analysis of pathological features related to tumor size. *J Urol* 2003;170(6 Pt 1):2217–20. DOI: 10.1097/01.ju.0000095475.12515.5e.
11. Zhou L., Zhang Z., Chen Y.C. et al. A deep learning-based radiomics model for differentiating benign and malignant renal tumors. *Transl Oncol* 2019;12(2):292–300. DOI: 10.1016/j.tranon.2018.10.012.
12. Said D., Hectors S.J., Wilck E. et al. Characterization of solid renal neoplasms using MRI-based quantitative radiomics features. *Abdom Radiol* 2020;45(9):2840–50. DOI: 10.1007/s00261-020-02540-4.
13. Uhlig J., Biggemann L., Nietert M.M. et al. Discriminating malignant and benign clinical T1 renal masses on computed tomography: a pragmatic radiomics and machine learning approach. *Medicine* 2020;99(16):e19725. DOI: 10.1097/MD.00000000000019725.
14. Yap F.Y., Varghese B.A., Cen S.Y. et al. Shape and texture-based radiomics signature on CT effectively discriminates benign from malignant renal masses. *Eur Radiol* 2021;31(2):1011–21. DOI: 10.1007/s00330-020-07158-0.
15. Deng Y., Soule E., Samuel A. et al. CT texture analysis in the differentiation of major renal cell carcinoma subtypes and correlation with Fuhrman grade. *Eur Radiol* 2019;29(12):6922–9. DOI: 10.1007/s00330-019-06260-2.
16. Erdim C., Yardimci A.H., Bektas C.T. et al. Prediction of benign and malignant solid renal masses: machine learning-based CT texture analysis. *Acad Radiol* 2020;27(10):1422–9. DOI: 10.1016/j.acra.2019.12.015.
17. Xi I.L., Zhao Y., Wang R. et al. Deep learning to distinguish benign from malignant renal lesions based on routine MR imaging. *Clin Cancer Res* 2020;26(8):1944–52. DOI: 10.1158/1078-0432.CCR-19-0374.
18. Znaor A., Lortet-Tieulent J., Laversanne M. et al. International variations and trends in renal cell carcinoma incidence and mortality. *Eur Urol* 2015;67(3):519–30. DOI: 10.1016/j.eururo.2014.10.002.
19. Chevillat J.C., Lohse C.M., Zincke H. et al. Comparisons of outcome and prognostic features among histologic subtypes of renal cell carcinoma. *Am J Surg Pathol* 2003;27(5):612–24. DOI: 10.1097/0000478-200305000-00005.
20. Yu H.S., Scalera J., Khalid M. et al. Texture analysis as a radiomic marker for differentiating renal tumors. *Abdom Radiol* 2017;42(10):2470–8. DOI: 10.1007/s00261-017-1144-1.

21. Zhang G.M.Y., Shi B., Xue H.D. et al. Can quantitative CT texture analysis be used to differentiate subtypes of renal cell carcinoma? *Clin Radiol* 2019;74(4):287–94. DOI: 10.1016/j.crad.2018.11.009.
22. Duan C., Li N., Niu L. et al. CT texture analysis for the differentiation of papillary renal cell carcinoma subtypes. *Abdom Radiol* 2020;45(11):3860–8. DOI: 10.1007/s00261-020-02588-2.
23. Wang W., Cao K.M., Jin S.M. et al. Differentiation of renal cell carcinoma subtypes through MRI-based radiomics analysis. *Eur Radiol* 2020;30(10):5738–47. DOI: 10.1007/s00330-020-06896-5.
24. Fuhrman S., Lasky L.C., Limas C. Prognostic significance of morphologic parameters in renal cell carcinoma. *Am J Surg Pathol* 1982;6(7):655–63. DOI: 10.1097/0000478-198210000-00007.
25. Moch H., Cubilla A.L., Humphrey P.A. et al. The 2016 WHO classification of tumours of the urinary system and male genital organs – part A: renal, penile, and testicular tumours. *Eur Urol* 2016;70(1):93–105. DOI: 10.1016/j.eururo.2016.02.029.
26. Tsui K.H., Shvarts O., Smith R.B. et al. Prognostic indicators for renal cell carcinoma: a multivariate analysis of 643 patients using the revised 1997 TNM staging criteria. *J Urol* 2000;163(4):1090–5. DOI: 10.1016/S0022-5347(05)67699-9.
27. Feng Z., Shen Q., Li Y., Hu Z. CT texture analysis: a potential tool for predicting the Fuhrman grade of clear-cell renal carcinoma. *Cancer Imaging* 2019;19(1):6. DOI: 10.1186/s40644-019-0195-7.
28. Goyal A., Razik A., Kandasamy D. et al. Role of MR texture analysis in histological subtyping and grading of renal cell carcinoma: a preliminary study. *Abdom Radiol* 2019;44(10):3336–49. DOI: 10.1007/s00261-019-02122-z.
29. Boos J., Revah G., Brook O.R. et al. CT intensity distribution curve (Histogram) analysis of patients undergoing antiangiogenic therapy for metastatic renal cell carcinoma. *Am J Roentgenol* 2017;209(2):W85–92. DOI: 10.2214/AJR.16.17651.
30. Bharwani N., Miquel M.E., Powles T. et al. Diffusion-weighted and multiphase contrast-enhanced MRI as surrogate markers of response to neoadjuvant sunitinib in metastatic renal cell carcinoma. *Br J Cancer* 2014;110(3):616–24. DOI: 10.1038/bjc.2013.790.
31. Ueno D., Yao M., Tateishi U. et al. Early assessment by FDG-PET/CT of patients with advanced renal cell carcinoma treated with tyrosine kinase inhibitors is predictive of disease course. *BMC Cancer* 2012;12:162. DOI: 10.1186/1471-2407-12-162.
32. Antunes J., Viswanath S., Rusu M. et al. Radiomics analysis on FLT-PET/MRI for characterization of early treatment response in renal cell carcinoma: a proof-of-concept study. *Transl Oncol* 2016;9(2):155–62. DOI: 10.1016/j.tranon.2016.01.008.
33. Goh V., Ganeshan B., Nathan P. et al. Assessment of response to tyrosine kinase inhibitors in metastatic renal cell cancer: CT texture as a predictive biomarker. *Radiology* 2011;261(1):165–71. DOI: 10.1148/radiol.11110264.

Вклад авторов

Д.Н. Гордуладзе, Е.С. Сирота: обзор публикаций по теме статьи, написание статьи;
Л.М. Рапопорт, Д.Г. Цариченко, П.В. Бочкарев: анализ полученных данных;
В.Н. Гридин, Ю.Г. Аляев: разработка дизайна статьи;
И.А. Кузнецов: написание статьи, получение данных для анализа.

Authors' contributions

D.N. Gorduladze, E.S. Sirota: reviewing of publications of the article's theme, article writing;
L.M. Rapoport, D.G. Tsarichenko, P.V. Bochkaryov: analysis of the obtained data;
V.N. Gridin, Yu.G. Alyaev: developing the article design;
I.A. Kuznetsov: article writing, obtaining data for analysis.

ORCID авторов / ORCID of authors

Д.Н. Гордуладзе / D.N. Gorduladze: <https://orcid.org/0000-0002-9586-7859>
Е.С. Сирота / E.S. Sirota: <https://orcid.org/0000-0001-6419-0155>
Д.Г. Цариченко / D.G. Tsarichenko: <https://orcid.org/0000-0002-3608-8759>
И.А. Кузнецов / I.A. Kuznetsov: <https://orcid.org/0000-0001-6905-2464>
П.В. Бочкарев / P.V. Bochkaryov: <https://orcid.org/0000-0002-5464-2733>

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Финансирование. Работа выполнена в рамках темы № 0071-2019-0001.
Financing. The work was performed within the framework of the theme No. 0071-2019-0001.

Статья поступила: 16.04.2021. **Принята к публикации:** 12.12.2021.
Article submitted: 16.04.2021. **Accepted for publication:** 12.12.2021.