

Современная лучевая диагностика в хирургии и онкологии Modern diagnostic radiology in surgery and oncology

ISSN 1995-5464 (Print); ISSN 2408-9524 (Online)

<https://doi.org/10.16931/1995-5464.2022-1-40-47>

Радиомика при заболеваниях печени и поджелудочной железы. Обзор литературы

Замятина К.А.^{1*}, Годзенко М.В.¹, Кармазановский Г.Г.^{1, 2}, Ревивили А.Ш.¹

¹ ФГБУ “Национальный медицинский исследовательский центр хирургии им. А.В. Вишневского” Минздрава России; 117997, Москва, ул. Большая Серпуховская, д. 27, Российская Федерация

² ФГАОУ ВО “Российский национальный исследовательский медицинский университет им. Н.И. Пирогова” Минздрава России; 117997, Москва, ул. Островитянова, д. 1, Российская Федерация

Проведено изучение зарубежной литературы, посвященной применению текстурного анализа, а также сравнение литературных данных с результатами изучения радиомики специалистами НМИЦ хирургии им. А.В. Вишневского. Публикации отбирали по ключевым словам “radiomics”, “radiology”, “texture analysis”, “perspectives”, “clinical implementation”. Поиск ограничивали только работами на английском языке за последние 5 лет, преимущественно посвященными заболеваниям печени и поджелудочной железы. Отмечено, что новые данные появляются регулярно, а тема не теряет актуальности. По мнению большинства авторов, радиомика действительно может быть эффективна в диагностике, наблюдении за пациентами и планировании лечения, что подтверждают результаты, полученные специалистами НМИЦ хирургии им. А.В. Вишневского. Однако консенсус по применению радиомики не достигнут, что задерживает ее внедрение в клиническую практику.

Ключевые слова: радиомика, текстурный анализ, перспективы, возможности, проблемы внедрения, поджелудочная железа, печень

Ссылка для цитирования: Замятина К.А., Годзенко М.В., Кармазановский Г.Г., Ревивили А.Ш. Радиомика при заболеваниях печени и поджелудочной железы. Обзор литературы. *Анналы хирургической гепатологии*. 2022; 27 (1): 40–47. <https://doi.org/10.16931/1995-5464.2022-1-40-47>.

Авторы подтверждают отсутствие конфликтов интересов.

Radiomics in liver and pancreatic disorders: a review

Zamyatina K.A.^{1*}, Godzenko M.V.¹, Karmazanovsky G.G.^{1, 2}, Revishvili A.Sh.¹

¹ A.V. Vishnevsky National Medical Research Center of Surgery of the Ministry of Healthcare of the Russian Federation; 27, Bol'shaya Serpukhovskaya str., Moscow, 117997, Russian Federation

² Pirogov Russian National Research Medical University of the Ministry of Healthcare of the Russian Federation; 1, Ostrovitjanova str., Moscow, 117997, Russian Federation

A study of the international literature on texture analysis was performed, and the reported data was compared to the findings of radiomics studies performed by the specialists of our institute. The relevant papers were searched using a combination of the following search terms: “radiomics”, “radiology”, “texture analysis”, “perspectives”, and “clinical implementation”. The search was limited to papers published in English within the last 5 years, which essentially focused on liver and pancreas disorders. Due to the publication of new data on a fairly daily basis, the topic has not lost its relevance. The vast majority of authors confirm that radiomics can be efficiently used during diagnosis, treatment planning, and patient monitoring. However, consensus on the implementation of radiomics has not been reached yet, thereby delaying its introduction into clinical practice. The data collected in our institution reports that the clinical application of texture analysis methods may be very promising.

Keywords: radiomics, texture analysis, prospects, opportunities, implementation issues, pancreas, liver

For citation: Zamyatina K.A., Godzenko M.V., Karmazanovsky G.G., Revishvili A.Sh. Radiomics in liver and pancreatic disorders: a review. *Annaly khirurgicheskoy gepatologii = Annals of HPB surgery*. 2022; 27 (1): 40–47. (In Russian). <https://doi.org/10.16931/1995-5464.2022-1-40-47>.

The authors declare no conflict of interests.

● Введение

Для чего нужна и почему появилась радиомика в лучевой диагностике?

С развитием инструментальных методов диагностики увеличилась диагностическая ценность рентгенологических изображений (КТ, МРТ). Однако еще сохраняются ограничения в диагностике некоторых заболеваний. Например, методы контрастного усиления позволяют проводить дифференциальную диагностику злокачественных образований и оценивать сосудистую инвазию, но их результаты не всегда достоверны вследствие технических и анатомических особенностей. Использование гепатоспецифических контрастных препаратов и диффузионно-взвешенных изображений позволяет дифференцировать гепатоцит-содержащие образования, но существуют ограничения: атипичное накопление контрастного препарата образованием, малые размеры, неоднородность накопления из-за разной степени дифференцировки клеток в структуре образования.

В настоящее время благодаря развитию методов искусственного интеллекта (ИИ) появилась возможность применять их для решения упомянутых задач в медицинской диагностике и превратить качественные данные исследований в количественные. Это позволит увеличить диагностическую значимость изобразительных методов исследования при различных заболеваниях. Наиболее изученный метод количественной визуализации — радиомика, метод текстурного анализа. Он основан на глубоком обучении и высокопроизводительном извлечении текстур из цифровых изображений, т.е. на оценке структуры. Такой принцип оценки изображений может увеличить их клиническую ценность в диагностике, в частности, онкологических заболеваний печени и поджелудочной железы, помочь в дифференциальной диагностике образований, оценке эффективности химиотерапии опухолей, их распространенности (инвазия сосудов), изучении морфологии всего объема образования в отличие от биопсии. Это также необходимо для развития персонализированной медицины [1]. Преимущества метода — высокая диагностическая точность, минимальная инвазивность, возможность автоматизировать часть работы врачей, персонифицированный подход [2].

С 2015 г. стали появляться первые публикации о применении метода текстурного анализа в лучевой диагностике, и с каждым годом их число быстро возрастало. Всего за 6 лет опубликовано более 4120 работ, посвященных использованию радиомики в дифференциальной диагностике заболеваний с применением различных лучевых методов (КТ-фазы контрастирования, МРТ-последовательности), порядка 500 — при заболеваниях печени и поджелудочной железы.

Но будет ли, наконец, какая-то практическая польза от такого числа исследований? Что мешает ввести метод текстурного анализа в повседневную практику? Какие проблемы предстоит устранить для оправдания многообещающих результатов исследований? Какие задачи позволит решить внедрение радиомики в работу клинических центров?

Провели оценку перспектив радиомики, подвергли сравнению и анализу проблемы, с которыми авторы столкнулись при внедрении метода в рамках собственных работ и описанных в зарубежных публикациях по текстурному анализу. В НМИЦ хирургии им. А.В. Вишневского в настоящее время также проводятся научные работы с применением метода в области дифференциальной диагностики образований поджелудочной железы и печени, есть опубликованная статья [3]. Зарубежные публикации для анализа отбирали по ключевым словам “radiomics”, “radiology”, “texture analysis”, “perspectives”, “clinical implementation”. Поиск ограничивали только работами на английском языке за 5 лет. Последний раз поиск литературы проводили 15 октября 2021 г.

Из каждой публикации выписывали как перспективы метода, так и замечания авторов, которые, по их мнению, не позволяют начать использовать радиомик в их центре. Основные многообещающие положительные стороны радиомики распределены по группам: точность диагностики, неинвазивность, автоматизация работы врача и дифференцированный подход. Проблемы ее использования также решено объединить в группы: объяснимость (“черный ящик”) ИИ, единая методология (стандартизация) проведения лучевых исследований и получения изображений, сегментация изображений для текстурного анализа, стандартизация платформ текстурной обработки изображений, недостаточно большой объем исходных данных в этой области.

Перспективы и преимущества текстурного анализа

Высокая точность диагностики. Точность диагностики значительно увеличивается благодаря способности радиомики выявлять неочевидные признаки, учитывать патофизиологические особенности процесса [4, 5]. Упомянутые ограничения в выявлении гепатоцит-содержащих опухолей могут быть преодолены с помощью этого метода. Изучают и отбирают радиомические характеристики МР-изображений гепатоцеллюлярных карцином и гемангиом при циррозе печени с применением гадооксетовой кислоты [6]. Перспективными будут также исследования по выявлению радиомических биомаркеров МР-изображений с контрастированием

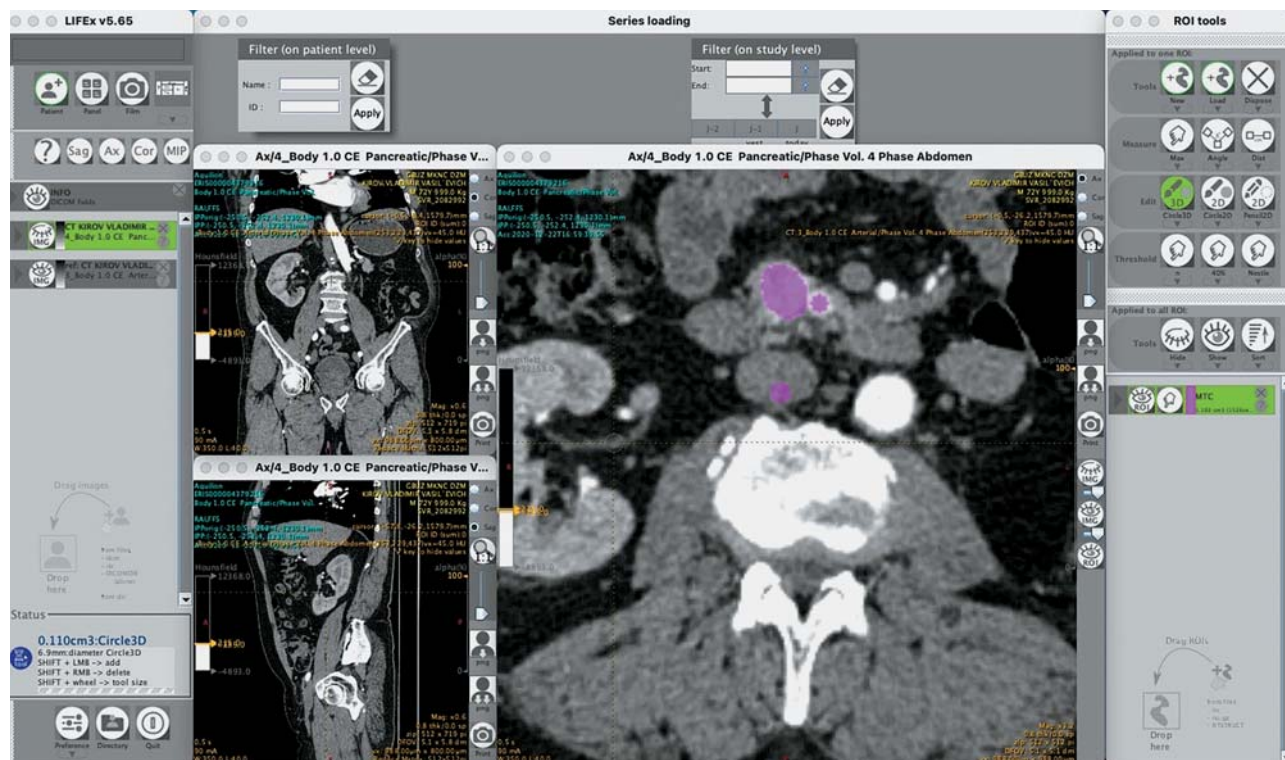


Рисунок. Фото экрана. Ручная разметка ROI гипervasкулярных образований поджелудочной железы в программе для текстурного анализа LifeX [3].

Figure. Screenshot: Manual segmentation of pancreatic hypervascular lesions and region of interest extraction in the LifeX software for texture analysis [3].

ем гадоксетовой кислотой для дифференциальной диагностики гепатоцеллюлярного рака и регенераторных узлов при циррозе, аденом, фокально-нодулярной гиперплазии и других образований.

Внутрисосудистая опухолевая инвазия — плохой прогностический признак, но при стандартных исследованиях с контрастным усилением не всегда удается выявить микроинвазию. Радиомика показала хорошие результаты в ее выявлении и прогнозировании раннего и позднего рецидива [7]. Также есть исследования, указывающие на то, что радиомика и ИИ облегчают прогнозирование исходов заболеваний и классификацию групп риска [8]. Существуют маркеры-предикторы раннего рецидива у пациентов с гепатоцеллюлярным раком, как в исследовании текстурных характеристик МРТ с гадоксетовой кислотой [9].

Применение радиомического метода на основе ПЭТ/КТ с ^{18}F -ФДГ может повысить специфичность и чувствительность при обнаружении небольших опухолей или новообразований с низкой скоростью метаболизма, например муцинозной аденокарциномы [10].

Неинвазивная диагностика новообразований. Радиомику можно рассматривать как своего рода неинвазивный инструмент [11], что важно для диагностики опухолей у тяжелобольных, кото-

рые с трудом переносят инвазивные процедуры [12]. При крупных гетерогенных опухолях возможна оценка структуры всей опухолевой массы (рисунок), что затруднительно для биопсии [13]. Например, показана эффективность радиомического метода на основе КТ в классификации нейроэндокринных опухолей поджелудочной железы [3] или опухолей почек [3, 14].

Во многих исследованиях показано, что радиомика, в том числе с применением машинного обучения, может помочь в обнаружении злокачественных образований, дифференциальной диагностике с доброкачественными образованиями, стадировании, стратификации риска, планировании тактики лечения, оценке ответа на лечение и определении прогноза [10]. Метод дает возможность оценить меж- и внутриопухолевую гетерогенность [3], в том числе применительно к прогнозу и фармакорезистентности [13, 15].

Автоматизация работы врачей и персонализированный подход. К потенциальным преимуществам радиомики относят применение новых технологий, таких как машинное обучение [1]. Это дает возможность оценивать большие объемы данных и автоматизировать часть работы врачей [2, 8], что сокращает время до начала лечения, помогает врачам в выборе оптимальных его вариантов для каждого пациента [12]. Получение количественных данных из изобра-

жений, которые могут охарактеризовать фенотип опухоли, помогает прогнозировать ответ на лечение [16–18]. К примеру, с помощью радиомики появляется возможность дифференцировки молекулярных подтипов гепатоцеллюлярной карциномы по новой классификации [19].

В последнее время быстро развивается область, которая определяет характеристики опухоли с помощью корреляции между радиомическими признаками и генотипом пациента, — радиогеномика [20]. В одной из работ показано, что радиомика может помочь в оценке статуса мутации генов, что является важным фактором в прогнозировании ответа рака прямой кишки и ее метастазов на неоадьювантную химиолучевую терапию и стратификации риска опухоли [21].

Вместе с тем помимо многообещающих результатов, отраженных во множестве исследований, существует и сопоставимое число сложностей внедрения в клиническую практику.

Проблемы внедрения

“Черный ящик” ИИ. Большинство доступных средств диагностики, использующих ИИ, функционируют как “черный ящик”. Это означает, что результаты не включают причины, по которым система “признает” наличие у пациента определенного заболевания, и потому не могут быть проверены врачами и регулируемыми органами. В радиомике проблема сводится к объяснимости результативных показателей текстурного анализа: что означает тот или иной количественный показатель? Это может привести к диагностическим ошибкам. Поэтому необходимо в тесном сотрудничестве со специалистами по обработке данных создать стандартизованный протокол, поясняющий то или иное “решение” ИИ и все его количественные показатели.

В настоящее время усилия направлены на предоставление объяснимых алгоритмов ИИ, проводят изучение корреляции выбранных характеристик с биологическими или семантическими характеристиками [2, 22]. Биомаркеры определяют как “объективные признаки медицинского состояния, наблюдаемые за пределами пациента, которые можно точно и воспроизводимо измерить”. Суть выбора биомаркера — это возможность объективно его измерить. Воспроизводимость количественных характеристик изображения при различных его параметрах в настоящее время является очень серьезным препятствием для клинического применения. Дискуссии об “объяснимом” ИИ привели к расширению этой темы: от растущего числа публикаций по технической работе над интерпретируемыми моделями и “объяснимым” ИИ до вводных общественных наук о смысле объяснения [23]. Существует специальная международная

организация Image Biomarker Standardisation Initiative (IBSI), которая работает над стандартизацией извлечения радиомических биомаркеров из полученных изображений для высокопроизводительного количественного анализа [20].

Стандартизация проведения лучевых исследований и получения изображений. Возможности стандартизации у разных методов лучевой диагностики отличаются. КТ считают более стандартизованным методом, который легче перевести в количественные характеристики, поскольку в нем используют единицы Хаунсфилда (HU). МРТ не имеет таких стандартизованных измерений интенсивности. Однако, несмотря на то что при КТ применяют стандартизованные измерения, радиомика на основе КТ не всегда хорошо воспроизводима. В нескольких исследованиях указано, что большинство радиомических характеристик при различных параметрах получения и реконструкции изображений существенно различаются [12, 24, 25], поскольку существуют различия в дозах, ядрах реконструкции, толщине срезов между различными медицинскими учреждениями и томографами, хотя такие физические различия можно привести к эталону для использования радиомики. Различия в усилии вдоха могут изменить ослабление и объем легких, органов брюшной полости, что может привести к неверной интерпретации и сегментации, влияя как на пороговую оценку, так и на количественную оценку на основе гистограммы [26].

Радиомика на основе МРТ еще более сложна для стандартизации по сравнению с КТ. На качество МР-изображений влияет больше факторов, помимо отсутствия стандартизованных измерений интенсивности [27]. В некоторых исследованиях авторы сообщают о стабильности различных МР-радиомических показателей: T2-взвешенных изображений и коэффициента диффузии (ADC) при повторном тестировании и для различных типов рака, центров и производителей [15, 18].

Ряд исследователей сообщают о том, что значительное число текстурных характеристик не воспроизводится в условиях повторного исследования, несмотря на одинаковые параметры сканирования на одном и том же томографе, даже при использовании более стандартизованного метода КТ [13, 28]. При повторном стандартизованном КТ-сканировании двух фантомов, применяемых для определения воспроизводимых характеристик, значительная часть показателей отличалась [29].

Помимо этого, применение контрастных веществ добавляет еще больше сложностей для воспроизводимости функций: изменения в работе сердца могут влиять на распределение контрастного препарата в теле в разные временные промежутки, что невозможно прогнозировать и стандартизировать. Временной промежуток

между введением контрастного препарата и получением сканирования, который может немного отличаться в разных центрах [30], может быть стандартизован для дальнейшего применения в радиомике.

Необходимо предварительно отобрать стабильные текстурные характеристики изображений и создать корректную структуру протоколов проведения исследований, в том числе на томографах разных производителей [3, 31], а невозпроизводимые элементы характеристик должны быть удалены.

Сегментация изображения для текстурного анализа. Различия в сегментации по-разному влияют на количественные значения характеристик изображения. Чаще сегментацию исследователи проводят вручную, и результаты могут варьировать ввиду индивидуального подхода каждого врача [26]. Результаты собственного исследования свидетельствуют, что разница в сегментации между двумя врачами значительна при крупных образованиях [3]. Вероятно, ситуация может быть улучшена за счет исследований, направленных на выявление радиомических характеристик, устойчивых к изменчивости сегментирования [21], а также внедрения получили полностью автоматических методов, которые помогут находить надежные и воспроизводимые автоматические сегменты различных областей интереса [26]. Работ и исследований по предварительному глубокому машинному обучению для создания метода автоматического определения сегментов немало, и они содержат очень хорошие результаты. В 2021 г. была показана эффективность алгоритма обнаружения поражений на основе подобного обучения по КТ-изображениям метастазов колоректального рака [10]. При выборе области текстурной обработки с использованием автоматического метода могут проявляться и значительные недостатки, например, если алгоритм, созданный для выявления одного заболевания, “перепутает” его с другим, имеющим схожие признаки.

Стандартизация платформ текстурной обработки изображений. Специалистам известно, что для разных платформ радиомики созданы различные методы предварительной обработки и определения характеристик. Это приводит к различиям в оценке значений радиомических характеристик при использовании различных программных решений [2]. Основные, наиболее известные и применяемые платформы (в порядке уменьшения частоты цитирования по данным PubMed [8]) — MaZda [14], PyRadiomics [32], IBEX [33], LIFEx [34] и CERR [35]. Ранее упомянутая IBSI также отбирает надежные платформы радиомики. Из перечисленных платформ IBSI одобрены и применяются в стандартизации

только PyRadiomics, LIFEx и CERR. Эти платформы находятся в свободном доступе, имеют математические уравнения, задокументированные с достаточной детализацией, чтобы понять основу для их анализа, они достаточно новые (2017–2018), их программное обеспечение постоянно обновляется [8, 32, 34, 35].

Существуют работы, в которых проведено сравнение разных платформ, что представляет интерес. Надежность радиомических характеристик всех трех платформ была отличной, но выявлено заметное влияние версии на надежность функций в CERR и LIFEx. Характеристики, определенные как имеющие существенное отношение к выживаемости, различались между платформами [8].

Таким образом, для выбора платформы и ее стандартной настройки для получения полезных, надежных результатов необходимо дальнейшее изучение этих продуктов, настройка их расчетных характеристик и анализ результатов [22], обязательно с участием компьютерных специалистов, программистов, а также врачей.

Недостаточно большой объем исходных данных. Существует множество исследований по текстурному анализу, но в большинстве имеет место значительная статистическая диспропорция ввиду большого числа вариантов признаков в небольшой популяции. Это порождает значительную долю ложных результатов (так называемое “проклятие размерности”), поэтому следует выполнять перекрестную проверку признаков и (или) проводить исследования на больших популяциях [11, 36].

В некоторых анатомических областях ввиду неудобства разметки, значительной вариативности структур, а также при редких заболеваниях (типах опухолей) [3] или уникальных клинических наблюдениях с экстремальными значениями признаков [3, 26] сложно набрать достаточно материала для обучения ИИ и текстурной обработки. Это затрудняет обучение ИИ и (или) отбор подходящих радиомических характеристик.

У онкологических больных на результаты может влиять проведенное лечение. Это следует учитывать и проводить исследования между группами пациентов до и после лечения [25].

● Заключение

Радиомика — многообещающий метод увеличения клинической значимости стандартных изобразительных методов в лучевой диагностике, в том числе в выявлении, дифференцировке, стадировании опухолей печени и поджелудочной железы, а также в прогнозировании исхода и ответе на лечение. Несмотря на целый ряд преимуществ и многообещающих характеристик

радиомики, существуют преграды для ее внедрения в клиническую практику.

Известны главные задачи в этом направлении, требующие решения. Необходим предварительный отбор стабильных воспроизводимых текстурных характеристик, устойчивых к временным, анатомическим и техническим особенностям исследований, и изучение их корреляций с различными заболеваниями или морфологическими особенностями для разработки радиомических биомаркеров. Для применения радиомики в каждой области исследования и метода лучевой диагностики требуются стандартизованные структурные протоколы с учетом особенностей разных фирм и моделей томографов. Зоны сегментации должны отбираться автоматически, более стандартизованно и (или) с использованием платформ и ряда биомаркеров, слабо зависящих от погрешностей в разметке. Выбор платформ с их корректными надежными настройками очень важен для отбора полезных радиомических характеристик и применения текстурного анализа в практике. Для статистически более значимых результатов исследований необходимо увеличить число исследований по конкретным заболеваниям, хотя к некоторым редким заболеваниям и (или) экстремальным состояниям это может быть неприемлемо.

Пока радиомика не внедрена в работу клинических центров и больниц, упомянутые проблемы могут быть лишь верхушкой айсберга. В силу недостаточного программного обеспечения отдельных городских больниц и опыта применения радиомики сегодня это направление — перспектива для научно-исследовательских институтов.

Участие авторов

Замятина К.А. — написание текста статьи, идея, внесение дополнений и изменений в текст, анализ англоязычной литературы, дизайн исследования, сбор и обработка данных.

Годзенко М.В. — анализ англоязычной литературы.

Кармазановский Г.Г. — идея, концепция и дизайн исследования, утверждение окончательного варианта текста статьи.

Ревивили А.Ш. — концепция и дизайн исследования, утверждение окончательного варианта статьи.

Authors contributions

Zamyatina K.A. — writing text, making additions and changes to the text, analysis of English literature, design of the study, collection and analysis of data.

Godzenko M.V. — analysis of English literature.

Karmazanovsky G.G. — concept and design of the study, approval of the final version of the article.

Revishvili A.Sh. — concept and design of the study, approval of the final version of the article.

Список литературы [References]

- Chetan M.R., Gleeson F.V. Radiomics in predicting treatment response in nonsmall-cell lung cancer: current status, challenges and future perspectives. *Eur. Radiol.* 2021; 31 (2): 1049–1058. <https://doi.org/10.1007/s00330-020-07141-9>
- Ibrahim A., Primakov S., Beuque M., Woodruff H.C., Halilaj I., Wu G., Refaee T., Granzier R., Widaatalla Y., Hustinx R., Mottaghy F.M., Lambin P. Radiomics for precision medicine: current challenges, future prospects, and the proposal of a new framework. *Methods.* 2021; 188: 20–29. <https://doi.org/10.1016/j.ymeth.2020.05.022>
- Gruzdev I.S., Zamyatina K.A., Tikhonova V.S., Kondratyev E.V., Glotov A.V., Karmazanovsky G.G., Revishvili A.S. Reproducibility of CT texture features of pancreatic neuroendocrine neoplasms. *Eur. J. Radiol.* 2020; 133: 109371. <https://doi.org/10.1016/j.ejrad.2020.109371>
- Smits M. MRI biomarkers in neuro-oncology. *Nat. Rev. Neurol.* 2021; 17 (8): 486–500. <https://doi.org/10.1038/s41582-021-00510-y>
- Laudicella R., Comelli A., Stefano A., Szostek M., Crocè L., Vento A., Spataro A., Comis A.D., La Torre F., Gaeta M., Baldari S., Alongi P. Artificial neural networks in cardiovascular diseases and its potential for clinical application in molecular imaging. *Curr. Radiopharm.* 2021; 14 (3): 209–219. <https://doi.org/10.2174/1874471013666200621191259>
- Chen M.D., Zhang J., Yang G.X., Lin J.M., Feng Y.Q. Differential diagnosis of hepatocellular carcinoma and hepatic hemangiomas based on radiomic features of gadoxetate disodium-enhanced magnetic resonance imaging. *Nan Fang Yi Ke Da Xue Xue Bao.* 2018; 38 (4): 428–433. Chinese. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-4254.2018.04.10>
- Yang L., Gu D., Wei J., Yang C., Rao S., Wang W., Chen C., Ding Y., Tian J., Zeng M.A. Radiomics nomogram for preoperative prediction of microvascular invasion in hepatocellular carcinoma. *Liver Cancer.* 2019; 8 (5): 373–386. <https://doi.org/10.1159/000494099>
- Fornacon-Wood I., Mistry H., Ackermann C.J., Blackhall F., McPartlin A., Faivre-Finn C., Price G.J., O'Connor J.P.B. Reliability and prognostic value of radiomic features are highly dependent on choice of feature extraction platform. *Eur. Radiol.* 2020; 30 (11): 6241–6250. <https://doi.org/10.1007/s00330-020-06957-9>
- Kim S., Shin J., Kim D.Y., Choi G.H., Kim M.J., Choi J.Y. Radiomics on gadoxetic acid-enhanced magnetic resonance imaging for prediction of postoperative early and late recurrence of single hepatocellular carcinoma. *Clin. Cancer Res.* 2019; 25 (13): 3847–3855. <https://doi.org/10.1158/1078-0432.CCR-18-2861>
- Kim K., Kim S., Han K., Bae H., Shin J., Lim J.S. Diagnostic performance of deep learning-based lesion detection algorithm in CT for detecting hepatic metastasis from colorectal cancer. *Korean J. Radiol.* 2021; 22 (6): 912–921. <https://doi.org/10.3348/kjr.2020.0447>
- Limkin E.J., Sun R., Dercle L., Zacharaki E.I., Robert C., Reuzé S., Schernberg A., Paragios N., Deutsch E., Fertet C. Promises and challenges for the implementation of computational medical imaging (radiomics) in oncology. *Ann. Oncol.* 2017; 28 (6): 1191–1206. <https://doi.org/10.1093/annonc/mdx034>
- Zhovannik I., Bussink J., Traverso A., Shi Z., Kalendralis P., Wee L., Dekker A., Fijten R., Monshouwer R. Learning from scanners: bias reduction and feature correction in radiomics.

- Clin. Transl. Radiat. Oncol.* 2019; 19: 33–38.
https://doi.org/10.1016/j.ctro.2019.07.003.
13. Van Timmeren J.E., Leijenaar R.T.H., van Elmpt W., Wang J., Zhang Z., Dekker A., Lambin P. Test-retest data for radiomics feature stability analysis: generalizable or study-specific? *Tomography*. 2016; 2 (4): 361–365.
https://doi.org/10.18383/j.tom.2016.00208
 14. Szczypiński P.M., Strzelecki M., Materka A., Klepaczko A. MaZda – a software package for image texture analysis. *Comput. Methods Programs Biomed.* 2009; 94 (1): 66–76.
https://doi.org/10.1016/j.cmpb.2008.08.005
 15. Fiset S., Welch M.L., Weiss J., Pintilie M., Conway J.L., Milosevic M., Fyles A., Traverso A., Jaffray D., Metser U., Xie J., Han K. Repeatability and reproducibility of MRI-based radiomic features in cervical cancer. *Radiother. Oncol.* 2019; 135: 107–114. https://doi.org/10.1016/j.radonc.2019.03.001
 16. Sugano D., Sanford D., Abreu A., Duddalwar V., Gill I., Cacciamani G.E. Impact of radiomics on prostate cancer detection: a systematic review of clinical applications. *Curr. Opin. Urol.* 2020; 30 (6): 754–781.
https://doi.org/10.1097/MOU.0000000000000822
 17. Peerlings J., Woodruff H.C., Winfield J.M., Ibrahim A., Van Beers B.E., Heerschap A., Jackson A., Wildberger J.E., Mottaghy F.M., DeSouza N.M., Lambin P. Stability of radiomics features in apparent diffusion coefficient maps from a multi-centre test-retest trial. *Sci. Rep.* 2019; 9 (1): 4800.
https://doi.org/10.1038/s41598-019-41344-5
 18. Calderaro J., Ziol M., Paradis V., Zucman-Rossi J. Molecular and histological correlations in liver cancer. *J. Hepatol.* 2019; 71 (3): 616–630. https://doi.org/10.1016/j.jhep.2019.06.001
 19. Badic B., Tixier F.T., Cheze Le Rest C., Hatt M., Visvikis D. Radiogenomics in colorectal cancer. *Cancers (Basel)*. 2021; 13 (5): 973. https://doi.org/10.3390/cancers13050973
 20. Image Biomarker Standardisation Initiative; 2019 [обновлено 21 сентября 2021; процитировано 30 октября 2016]. Доступно: <https://theibsi.github.io/news/>
 21. Stanzione A., Verde F., Romeo V., Boccadifuoco F., Mainenti P.P., Maurea S. Radiomics and machine learning applications in rectal cancer: current update and future perspectives. *World J. Gastroenterol.* 2021; 27 (32): 5306–5321.
https://doi.org/10.3748/wjg.v27.i32.5306
 22. European Commission. Joint Research Centre Robustness and Explainability of Artificial Intelligence: From Technical to Policy Solutions. (accessed on 2 March 2021); Available online: <https://data.europa.eu/doi/10.2760/57493>. [Reflist]
 23. Mackin D., Fave X., Zhang L., Fried D., Yang J., Taylor B., Rodriguez-Rivera E., Dodge C., Jones A.K., Court L. Measuring computed tomography scanner variability of radiomics features. *Invest. Radiol.* 2015; 50 (11): 757–765.
https://doi.org/10.1097/RLI.0000000000000180
 24. Chetan M.R., Gleeson F.V. Radiomics in predicting treatment response in non-small-cell lung cancer: current status, challenges and future perspectives. *Eur. Radiol.* 2021; 31 (2): 1049–1058.
https://doi.org/10.1007/s00330-020-07141-9
 25. Frix A.N., Cousin F., Refaie T., Bottari F., Vaidyanathan A., Desir C., Vos W., Walsh S., Occhipinti M., Lovinfosse P., Leijenaar R.T.H., Hustinx R., Meunier P., Louis R., Lambin P., Guiot J. Radiomics in lung diseases imaging: state-of-the-art for clinicians. *J. Pers. Med.* 2021; 11 (7): 602.
https://doi.org/10.3390/jpm11070602
 26. Webb A., Kagadis G.C. Introduction to biomedical imaging. *Med. Phys.* 2003; 30 (8): 2267. https://doi.org/10.1118/1.1589017
 27. Lu L., Ehmke R.C., Schwartz L.H., Zhao B. Assessing agreement between radiomic features computed for multiple CT imaging settings. *PLoS One*. 2016; 11 (12): e0166550.
https://doi.org/10.1371/journal.pone.0166550
 28. Berenguer R., Pastor-Juan M.D.R., Canales-Vázquez R.J., Castro-García M., Villas M.V., Mansilla Legorburo F., Sabater S. Radiomics of CT features may be nonreproducible and redundant: influence of CT acquisition parameters. *Radiology*. 2018; 288 (2): 407–415.
https://doi.org/10.1148/radiol.2018172361
 29. Bae K.T. Intravenous contrast medium administration and scan timing at CT: considerations and approaches. *Radiology*. 2010; 256 (1): 32–61. https://doi.org/10.1148/radiol.10090908
 30. Murgia A., Balestrieri A., Crivelli P., Suri J.S., Conti M., Cademartiri F., Saba L. Cardiac computed tomography radiomics: an emerging tool for the non-invasive assessment of coronary atherosclerosis. *Cardiovasc. Diagn. Ther.* 2020; 10 (6): 2005–2017. https://doi.org/10.21037/cdt-20-156
 31. Van Griethuysen J.J.M., Fedorov A., Parmar C., Hosny A., Aucoin N., Narayan V., Beets-Tan R.G.H., Fillion-Robin J.C., Pieper S., Aerts H.J.W.L. Computational radiomics system to decode the radiographic phenotype. *Cancer Res.* 2017; 77 (21): e104–e107. https://doi.org/10.1158/0008-5472.CAN-17-0339
 32. Zhang L., Fried D.V., Fave X.J., Hunter L.A., Yang J., Court L.E. IBEX: An open infrastructure software platform to facilitate collaborative work in radiomics. *Med. Phys.* 2015; 42 (3): 1341–1353. https://doi.org/10.1118/1.4908210
 33. Nioche C., Orlhac F., Boughdad S., Reuzé S., Goya-Outi J., Robert C., Pellot-Barakat C., Soussan M., Frouin F., Buvat I. LIFEX: A freeware for radiomic feature calculation in multi-modality imaging to accelerate advances in the characterization of tumor heterogeneity. *Cancer Res.* 2018; 78 (16): 4786–4789.
https://doi.org/10.1158/0008-5472.CAN-18-0125
 34. Apte A.P., Iyer A., Crispin-Ortuzar M., Pandya R., van Dijk L.V., Spezi E., Thor M., Um H., Veeraraghavan H., Oh J.H., Shukla-Dave A., Deasy J.O. Technical note: extension of CERR for computational radiomics: a comprehensive MATLAB platform for reproducible radiomics research. *Med. Phys.* 2018; 45: 1002/13046. https://doi.org/10.1002/mp.13046
 35. Sugano D., Sanford D., Abreu A., Duddalwar V., Gill I., Cacciamani G.E. Impact of radiomics on prostate cancer detection: a systematic review of clinical applications. *Curr. Opin. Urol.* 2020; 30 (6): 754–781.
https://doi.org/10.1097/MOU.0000000000000822
 36. Bezzi C., Mapelli P., Presotto L., Neri I., Scifo P., Savi A., Bettinardi V., Partelli S., Gianolli L., Falconi M., Picchio M. Radiomics in pancreatic neuroendocrine tumors: methodological issues and clinical significance. *Eur. J. Nucl. Med. Mol. Imaging*. 2021; 48 (12): 4002–4015.
https://doi.org/10.1007/s00259-021-05338-8

Сведения об авторах [Authors info]

Замятина Ксения Андреевна — аспирант по специальности “лучевая диагностика” ФГБУ “НМИЦ хирургии им. А.В. Вишневского” Минздрава России. <https://orcid.org/0000-0002-1643-6613>. E-mail: catos-zama@mail.ru

Годзенко Мария Вячеславовна — ординатор первого года по специальности “рентгенология” ФГБУ “НМИЦ хирургии им. А.В. Вишневского” Минздрава России. <https://orcid.org/0000-0001-8783-008X>. E-mail: mariel80797@gmail.com

Кармазановский Григорий Григорьевич — доктор мед. наук, профессор, член-корр. РАН, заведующий отделением рентгенологии и магнитно-резонансных исследований с кабинетом ультразвуковой диагностики ФГБУ “НМИЦ хирургии им. А.В. Вишневского” Минздрава России; профессор кафедры лучевой диагностики и терапии медико-биологического факультета ФГБОУ ВО “РНИМУ им. Н.И. Пирогова” Минздрава России. <https://orcid.org/0000-0002-9357-0998>. E-mail: karmazanovsky@ixv.ru

Ревивили Амиран Шотаевич — доктор мед. наук, профессор, академик РАН, директор ФГБУ “НМИЦ хирургии им. А.В. Вишневского” Минздрава России. <https://orcid.org/0000-0003-1791-9163>. E-mail: amirevi@mail.ru

Для корреспонденции*: Замятина Ксения Андреевна — 117997, Москва, ул. Большая Серпуховская, д. 27, Российская Федерация. Тел.: +7-926-860-50-02. E-mail: catos-zama@mail.ru

Ksenia A. Zamyatina — post-graduate student in the specialty “Radial Diagnostics” of A.V. Vishnevsky National Medical Research Center of Surgery. <https://orcid.org/0000-0002-1643-6613>. E-mail: catos-zama@mail.ru

Maria V. Godzenko — first year resident physician in the specialty “Radiology” of A.V. Vishnevsky National Medical Research Center of Surgery. <https://orcid.org/0000-0001-8783-008X>. E-mail: mariel80797@gmail.com

Grigory G. Karmazanovsky — Doct. of Sci. (Med.), Professor, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Head of the Department of Radiology and Magnetic Resonance Research with the Ultrasound Examination Room of the A.V. Vishnevsky National Medical Research Center of Surgery; Professor of the Department of Radiation Diagnostics and Therapy, Medical-Biological Faculty, Pirogov Russian National Research Medical University. <https://orcid.org/0000-0002-9357-0998>. E-mail: karmazanovsky@ixv.ru

Amiran Sh. Revishvili — Doct. of Sci. (Med.), Professor, Academician of the Russian Academy of Sciences, Director of the A.V. Vishnevsky National Medical Research Center of Surgery. <https://orcid.org/0000-0003-1791-9163>. E-mail: amirevi@mail.ru

For correspondence*: Ksenia A. Zamyatina — 27, Bolshaya Serpukhovskaya str., Moscow, 117997, Russian Federation. A.V. Vishnevsky National Medical Research Center of Surgery. Phone: +7-926-860-50-02. E-mail: catos-zama@mail.ru

Статья поступила в редакцию журнала 15.11.2021.
Received 15 November 2021.

Принята к публикации 7.12.2021.
Accepted for publication 7 December 2021.