

ISSN 2313-7347 (print)

ISSN 2500-3194 (online)

АКУШЕРСТВО ГИНЕКОЛОГИЯ РЕПРОДУКЦИЯ

Включен в перечень ведущих
рецензируемых журналов и изданий ВАК

2023 • том 17 • № 4

OBSTETRICS, GYNECOLOGY AND REPRODUCTION

2023 Vol. 17 No 4

www.gynecology.ru

Данная интернет-версия статьи была создана с сайта <http://www.gynecology.ru>. Не предназначено для использования в коммерческих целях. Информацию о репринтах можно получить в редакции. Тел.: +7 (495) 504-5455; факс: +7 (495) 504-5456; эл. почта: info@ibis1.ru.

<https://doi.org/10.17749/2313-7347/ob.gyn.rep.2023.440>

Магнитно-резонансная томография при раке шейки матки: современные возможности радиомного анализа и перспективы развития методики

А.Е. Солопова^{1,2}, Ю.В. Носова³, Б.Б. Бендженова⁴

¹ФГБУ «Национальный медицинский исследовательский центр акушерства, гинекологии и перинатологии имени академика В.И. Кулакова» Министерства здравоохранения Российской Федерации; Россия, 117997 Москва, ул. академика Опарина, д. 4;

²ФГАОУ ВО Первый Московский государственный медицинский университет имени И.М. Сеченова Министерства здравоохранения Российской Федерации (Сеченовский университет); Россия, 119991 Москва, ул. Большая Пироговская, д. 2, стр. 4;

³Саудовско-немецкий госпиталь; Объединенные Арабские Эмираты, Дубай, Хадаэк Мухаммед Бин Рашид, Эль Барша Саут 3, ул. Хесса, д. 3/5;

⁴ГБУЗ «Городская клиническая больница имени С.П. Боткина Департамента здравоохранения города Москвы»; Россия, 125284 Москва, 2-й Боткинский проезд, д. 5

Для контактов: Алина Евгеньевна Солопова, e-mail: dr.solopova@mail.ru

Резюме

Введение. В связи с развитием современных визуализационных технологий в последние годы большое внимание уделяется радиомике и, в частности, текстурному анализу. Сложности клинической оценки распространенности опухолевого процесса при раке шейки матки (РШМ) приводят к необходимости расширения знаний о применении технологий медицинской визуализации от преимущественно качественного анализа к мультипараметрическому подходу, включая количественную оценку исследуемых параметров.

Цель: проанализировать литературные данные по использованию радиомики и анализу текстур изображений при диагностике и прогнозировании агрессивности онкогинекологических заболеваний, в том числе РШМ.

Материалы и методы. В работе проведен систематический поиск литературы по базам данных PubMed/MEDLINE, eLibrary, Scopus, в ресурсах NCCN, ESUR, ACR; интервал поиска – 2016–2023 гг. Были изучены все опубликованные работы по использованию радиомики и анализу текстур изображений при диагностике и прогнозировании РШМ. Поиск проводили по ключевым словам и словосочетаниям на русском и английском языках: «рак шейки матки», «радиомика», «текстурный анализ», «онкология», «cervical cancer», «radiomics», «texture analysis», «oncology». В исследование были включены полнотекстовые источники и литературные обзоры по изучаемой тематике. Дублирующиеся публикации исключались.

Результаты. Обобщены особенности и преимущества применения радиомики и анализа текстур изображений в диагностике РШМ. Внедрение радиомного подхода расширило взгляды на интерпретацию медицинских изображений. Параметры, извлекаемые из цифровых изображений на основе радиомики, в ряде исследований показали свою высокую информативность, что вносит вклад в повышение диагностической точности исследования, а также расширяет возможности прогнозирования эффективности лечения пациенток с РШМ.

Заключение. Применение радиомики в диагностике в онкогинекологии, в том числе РШМ, является одним из перспективных, активно развивающихся направлений анализа в лучевой диагностике, требующее дальнейшего изучения.

Ключевые слова: рак шейки матки, РШМ, радиомика, текстурный анализ, онкология

Для цитирования: Солопова А.Е., Носова Ю.В., Бендженова Б.Б. Магнитно-резонансная томография при раке шейки матки: современные возможности радиомного анализа и перспективы развития методики. *Акушерство, Гинекология и Репродукция*. 2023;17(4):500–511. <https://doi.org/10.17749/2313-7347/ob.gyn.rep.2023.440>.

Magnetic resonance imaging in cervical cancer: current opportunities of radiomics analysis and prospects for its further development

Alina E. Solopova^{1,2}, Julia V. Nosova³, Bova B. Bendzhenova⁴

¹Academician Kulakov National Medical Research Center for Obstetrics, Gynecology and Perinatology, Health Ministry of Russian Federation; 4 Akademika Oparina Str., Moscow 117997, Russia;

²Sechenov University; 2 bldg. 4, Bolshaya Pirogovskaya Str., Moscow 119991, Russia;

³Saudi German Hospital; 3/5 Hessa Str., Al Barsha South 3, Hadaek Mohammed Bin Rashid, Dubai, United Arab Emirates;

⁴Botkin City Clinical Hospital, Moscow Healthcare Department; 5 2nd Botkinsky Passage, Moscow 125284, Russia

Corresponding author: Alina E. Solopova, e-mail: dr.solopova@mail.ru

Abstract

Introduction. Due to the dynamic development of modern imaging technologies in recent years, much attention has been paid to radiomics particularly texture analysis. The complexity of clinically evaluated tumor procession in cervical cancer (CC) accounts for a need to expand knowledge on applying medical imaging technologies in oncologic diagnostics spanning from predominantly qualitative analysis to a multiparametric approach, including a quantitative assessment of study parameters.

Aim: to analyze the literature data on the use of radiomics and image texture analysis in diagnostics and prediction of aggressiveness of oncogynecological diseases including CC.

Materials and Methods. A 2016–2023 systematic literature search was carried out in the PubMed/MEDLINE, eLibrary, Scopus databases, NCCN, ESUR, ACR resources. All publications on radiomics and image texture analysis used in CC diagnostics and prediction were investigated, with queries for key words and phrases in Russian and English: «cervical cancer», «radiomics», «texture analysis», «oncology». The study included full-text sources and literature reviews on the study subject. Duplicate publications were excluded.

Results. The features and advantages of using radiomics and image texture analysis in CC diagnostics were summarized. The introduction of the radiomic approach has expanded the views on interpretation of medical imaging data. The radiomics-based parameters extracted from digital images revealed high informativeness in some studies that contribute to improving diagnostic accuracy as well as expanding opportunities for predicting therapeutic effectiveness in CC patients.

Conclusion. Radiomics used in diagnostics of oncogynecological diseases including CC is one of the promising actively developing areas of analysis in radiology that requires to be further investigated.

Keywords: cervical cancer, CC, radiomics, texture analysis, oncology

For citation: Solopova A.E., Nosova J.V., Bendzhenova B.B. Magnetic resonance imaging in cervical cancer: current opportunities of radiomics analysis and prospects for its further development. *Akusherstvo, Ginekologia i Reprodukcija = Obstetrics, Gynecology and Reproduction*. 2023;17(4):500–511. (In Russ.). <https://doi.org/10.17749/2313-7347/ob.gyn.rep.2023.440>.

Введение / Introduction

Согласно статистическим данным 2021 г. злокачественных новообразований, рак шейки матки (РШМ) занимает в России 5-е место (4,9 % от общего количества злокачественных образований) в структуре онкологической заболеваемости у женщин и 10-е место в структуре смертности. По оценке GLOBOCAN (англ. Global Cancer Observatory, Мировая статистика заболеваемости раком), на 2020 г. в мире зарегистрировано 604 тыс. новых случаев РШМ, из них 342 тыс. смертей [1]. Неуклонный рост заболеваемости РШМ и большой процент впервые выявленных опухолей на поздних стадиях объясняет необходимость разработки новых алгоритмов обследования и ведения пациенток.

Для стадирования РШМ во всем мире используется классификация Международной федерации ги-

некологии и акушерства (англ. International Federation of Gynecology and Obstetrics, FIGO, 2018) и Международной классификации стадий злокачественных новообразований (англ. Tumor, Nodus, Metastasis, TNM; 8-е издание, 2016).

Определение стадии при РШМ преимущественно основывается на клинических данных, при этом не всегда клинически возможно надежно оценить распространенность опухолевого процесса в полном объеме. Трудности, с которыми сталкивается клиницист, в первую очередь связаны с оценкой истинных размеров опухоли, в особенности ее эндофитной части, наличия и объема параметральной инвазии, вовлеченности в опухолевый процесс истинной стенки таза, а также с выявлением пораженных регионарных лимфатических узлов (как макро-, так и микрометастазов) [2, 3].

Основные моменты**Что уже известно об этой теме?**

- ▶ Радиомика является одним из новых направлений анализа цифровых изображений. Текстуриный анализ является частью радиомики и дает количественную оценку опухоли путем распределения и взаимосвязи уровней вокселей в изображении.
- ▶ В настоящее время наблюдается всплеск интереса к радиомике и текстуриному анализу в связи с возможностью извлечения дополнительных данных, которые могут повысить точность диагностики и клинических решений.
- ▶ В современной литературе сообщают об успешном использовании текстуриного анализа в онкологии, который может повысить диагностическую точность, прогнозировать эффективность лечения, появление отдаленных метастазов.

Что нового дает статья?

- ▶ Проанализированы литературные данные по радиомике и анализу текстур изображений в онкогинекологии, обобщены особенности и преимущества применения радиомики.
- ▶ Приведенный обзор отражает основы современного диагностического подхода в онкологии с использованием магнитно-резонансной томографии.

Как это может повлиять на клиническую практику в обозримом будущем?

- ▶ Внедрение радиомики и текстуриного анализа в клиническую практику расширит возможности диагностики и прогнозирования лечения.
- ▶ Развитие радиомики, в том числе текстуриного анализа, позволит клиницистам преодолеть сложности в стадировании, мониторинге ответа на терапию и выявлении рецидива при раке шейки матки.

В последние десятилетия применение технологической медицинской визуализации значительно расширилось, клиницисты и врачи функциональной диагностики шагнули далеко вперед от преимущественно качественного анализа к количественному подходу, раскрывающему огромное количество информации.

Пересмотренная классификация FIGO (2018) рекомендует использовать современные методы визуализации и данные патологоанатомического исследования, где они доступны, для стадирования злокачественного процесса на первом этапе. Классификация FIGO допускает любой из методов в зависимости от их доступности в лечебном учреждении – ультразвуковое исследование (УЗИ), компьютерную томографию (КТ), магнитно-резонансную томографию (МРТ), позитронно-эмиссионную томографию (ПЭТ) для получения информации о размере опухоли, статусе лимфатических узлов и локальном или системном распространении [4]. При этом МРТ является методом выбора для оценки поражения шейки матки размером более 5 мм и рекомендуется для начальной оценки в случаях, если размер опухоли превышает 2 см [5]. Высокое тканевое разрешение МРТ определяет

Highlights**What is already known about this subject?**

- ▶ Radiomics is one of the new approaches of the digital image analysis. Radiomic texture provides a quantitative tumor assessment by analyzing distribution and correlation in image voxels.
- ▶ Nowadays radiomics and texture analysis have gained a burst of interest due to an opportunity to obtain additional data able to increase the accuracy of diagnostics and clinical decision-making.
- ▶ In the current publications, is reported that texture analysis is successfully applied in oncology diseases that may elevate diagnostic accuracy, predict treatment efficiency and emergence of distant metastases.

What are the new findings?

- ▶ We have analyzed literature data on radiomics and image texture analysis in oncogynecology, summarized features and advances of using radiomics.
- ▶ The review mirrors basics of modern diagnostic approach in oncology relying on magnetic resonance imaging.

How might it impact on clinical practice in the foreseeable future?

- ▶ Introduction of radiomics and texture analysis in clinical practice provides deeper insights into treatment prediction.
- ▶ The development of radiomics including texture analysis, will allow to overcome complexities related to staging, monitoring therapy response as well as detecting cervical cancer relapse.

информативность при оценке опухолевого распространения в области малого таза. Специализированные импульсные последовательности МРТ – T2-взвешенное изображение (англ. T2-weighted image, T2-WI), диффузионно-взвешенное изображение (англ. diffusion-weighted imaging, DWI), динамическое усиление контраста (англ. dynamic contrast-enhanced, DCE) рассматриваются как наиболее перспективные в качестве основы прогнозирования и оценки ответа на лечение [6–8].

Радиомика на сегодняшний день является быстро расширяющейся областью клинических исследований, которая дает возможность количественной оценки внутриопухолевой гетерогенности [9]. Гетерогенность опухоли показала значительную корреляционную взаимосвязь с особенностями ее радиомной структуры у онкологических пациентов [10–12]. При этом с учетом бурного развития методики требуется анализ и обобщение актуальных на сегодняшний день мировых данных.

Цель: проанализировать литературные данные по использованию радиомики и анализу текстур изображений при диагностике и прогнозировании агрессивности онкогинекологических заболеваний, в том числе РШМ.

Материалы и методы / Materials and Methods

Проведен систематический поиск литературы по базам данных PubMed/MEDLINE с использованием строки поиска «Radiomics» [All Fields], «digital image texture analysis» [All Fields] и «Cervical cancer» [All Fields], в eLibrary – «радиомика» и «анализ текстур цифровых изображений», Scopus (подборки научных монографий и статей), в ресурсах Национальной комплексной сети по борьбе с раком (англ. National Comprehensive Cancer Network, NCCN), Европейского общества урогенитальной радиологии (англ. European Society of Urogenital Radiology, ESUR), Американского колледжа радиологии (англ. American College of Radiology, ACR); интервал поиска – 2016–2023 гг.

Были изучены все опубликованные работы по использованию радиомики и анализу текстур изображений при диагностике и прогнозировании онкологических заболеваний. В исследование были включены полнотекстовые источники и литературные обзоры по изучаемой тематике. Дублирующиеся публикации исключались.

Результаты и обсуждение / Results and Discussion

Современные подходы в диагностике рака шейки матки / Current approaches to cervical cancer diagnostics

Рак шейки матки остается важной проблемой всемирного общественного здравоохранения, несмотря на очевидные достижения последних лет в области профилактики, скрининга и ранней диагностики.

Пересмотренная система стадирования FIGO (2018) включила в стадию IB3 дополнительные группы в зависимости от размера первичной опухоли: IB1 (≤ 2 см), IB2 (> 2 см и ≤ 4 см) и IB3 (> 4 см). Стадия IB1 дает возможность проведения органосохраняющего лечения, стадии IB2 и IB3 подлежат неoadъювантной химиотерапии (НАХТ) и радикальному хирургическому лечению. Дистанционная лучевая терапия в сочетании с химиотерапией на основе платины (ХЛТ) с последующей брахитерапией в настоящее время является основным методом лечения местнораспространенных стадий РШМ (IIB–IVA) [13]. Хотя показатели выживаемости с местнораспространенным РШМ улучшаются, у каждой третьей пациентки развиваются локальные и внутритазовые рецидивы, что подтверждает гипотезу о наличии остаточного заболевания после окончания ХЛТ [14].

Несмотря на положительные стороны, связанные с этим терапевтическим подходом, отдаленные результаты лечения (общая выживаемость) по-прежнему составляют лишь 57–67 %, что требует поиска более эффективных стратегий диагностики и лечения

[15–17]. В то же время при IB2–IIA стадиях радикальное хирургическое вмешательство является альтернативным вариантом лечения; также опубликован ряд работ по применению НАХТ при IIB стадии с последующим радикальным хирургическим лечением. НАХТ в последние годы широко применяется у больных РШМ как с целью уменьшения размеров первичной опухоли, так и для улучшения результатов лучевой и хирургического лечения.

Согласно данным метаанализа, НАХТ с последующим хирургическим вмешательством улучшает результаты выживаемости по сравнению с лучевой терапией [18].

Существенным преимуществом применения НАХТ также является снижение рисков развития ранних и поздних послеоперационных осложнений. Одним из главных маркеров прогноза и эффективности проводимой неoadъювантной терапии является регресс опухоли как по данным лучевых методов исследования, так и на основании микроскопического анализа лечебного патоморфоза. Однако ключевую роль в этом по-прежнему играет клиническая оценка эффекта для определения групп пациентов, которые нуждаются в хирургическом лечении или проведении лучевой терапии. В качестве основных ошибок при выборе терапии выступают местные рецидивы и отдаленные метастазы, что говорит о наличии микроскопически остаточного заболевания и представляет собой основной фактор риска прогрессирования процесса. В клинической практике стандартом ранней диагностики РШМ на сегодняшний день является кольпоскопия, цитологическое исследование цервикальных мазков, гистологическое исследование биоптата шейки матки и цервикального канала. Однако наиболее прогностически значимые признаки опухоли, такие как статус лимфатических узлов, параметральная и лимфоваскулярная инвазия, часто недооцениваются из-за очевидных ограничений этого метода [4]. В таком случае единственным способом оценить лимфоваскулярную инвазию или обнаружить микроэмболы опухоли в структуре зачастую визуально интактного лимфоузла является выполнение расширенного оперативного вмешательства с последующей морфологической оценкой удаленных препаратов [8]. В связи с этим для выбора оптимального и безопасного метода лечения клиницисту критически важно получить сведения о размере, распространенности первичной опухоли и вовлеченности в процесс лимфатических узлов на предоперационном этапе. МРТ в настоящее время считается «золотым» стандартом визуализационной диагностики для локальной оценки стадии РШМ и прогноза перед началом лечения [4, 5]. Классификация FIGO (2018), а также рекомендации ESUR (2020) подчеркивают значимость инструментальной предоперационной оценки шейки матки и рекомендуют использовать результаты визуализационных

исследований (МРТ, КТ, ПЭТ-КТ) как обязательную часть стадирования. Пересмотренная система стадирования признает важность оценки размера опухоли как основного фактора риска метастазирования, а также исследования состояния регионарных лимфатических узлов и вовлеченность параметральной клетчатки в опухолевый процесс [19].

Кроме того, МРТ широко применяется для оценки терапевтического эффекта после проведенной неоадьювантной терапии, предоставляя данные о клиническом ответе опухоли на лечение, а также об основных прогностических факторах, тем самым распределяя пациентов на группы, которым в зависимости от полученных результатов будет показано хирургическое лечение или лучевая терапия.

Мультипараметрическая магнитно-резонансная томография / Multiparametric magnetic resonance imaging

Магнитно-резонансная томография обладает многими преимуществами в связи с высокой пространственной и тканевой визуализацией по сравнению с такими диагностическими методами, как УЗИ и КТ, и предоставляет возможность с высокой точностью определять изменения в структуре опухоли. Корреляция между визуализационными и патоморфологическими критериями поспособствовала изменению рекомендаций ESUR [20]. Сочетание T2-WI и DWI является мощным клиническим инструментом МР-исследования при РШМ, при этом DCE-MPT является предпочтительным, но необязательным дополнением при первичном стадировании заболевания [21].

Пораженная ткань характеризуется промежуточной интенсивностью сигнала на T2-WI, повышенной на DWI с высоким b-фактором и сниженной на параметрических картах измеряемого коэффициента диффузии (ИКД) [22]. T2-WI характеризуются высоким естественным мягкотканым контрастом и позволяют с высокой точностью визуализировать контуры и внутреннюю структуру опухоли, реактивные изменения и степень инфильтрации стромы шейки матки, так как ткань новообразования обладает более высокой интенсивностью сигнала относительно гипоинтенсивной неизменной стромы. Кроме того, нативные T2-WI позволяют оценить распространение опухоли за пределы шейки матки – инфильтрацию параметриальной клетчатки, а также контактную инфильтрацию соседних органов, включая прямую кишку и мочевого пузыря [23].

DWI-MPT позволяет отобразить процесс диффузии молекул воды в биологических тканях [24, 25]. Для оценки истинного ограничения диффузии используются несколько b-факторов: базовый низкий – 0 с/мм², а также 500/800/1000 с/мм². Далее строятся параметрические карты измеряемого коэффициента диффузии (ИКД-карты), которые пред-

ставляют собой цветное отражение различных значений ИКД [26].

DWI-MPT с построением ИКД-карт обладает высокой чувствительностью (91–97 %) и специфичностью (91–100 %) в характеристике наличия и оценки местного распространения РШМ, поскольку среднее значение ИКД в опухолевой ткани значительно ниже показателей в нормальной ткани шейки матки [3]. ИКД может быть использован как дополнительный критерий в определении степени агрессии опухоли шейки матки, а также прогнозировать эффективность лечения РШМ [27].

По данным исследований, МРТ обладает высокой диагностической точностью в оценке местного распространения опухоли (специфичность = 88–91 %) в диагностике распространения РШМ в стенку мочевого пузыря/прямой кишки [28, 29].

На DWI с высоким b-фактором лимфатические узлы в норме обладают высокой интенсивностью сигнала, что связано с характеристиками лимфоидной ткани. Отсутствие различий в значениях ИКД интактных и метастатических лимфоузлов ограничивают возможности метода [30]. Специфичность и чувствительность для увеличенных лимфоузлов с нарушенной структурой выше, чем при вторичном поражении лимфоузла без увеличения размера. Таким образом, опубликованные за последние годы работы отечественных и зарубежных коллег демонстрируют неоднозначные результаты диагностической эффективности МРТ с применением стандартных последовательностей по сравнению с патоморфологическим исследованием.

По данным метаанализа, опубликованного в 2019 г., чувствительность метода при оценке параметральной инвазии варьировала от 43,2 до 81,1 %, что может привести к некорректному определению исходной стадии заболевания, ошибкам в интерпретации клинического ответа опухоли на лечение и, как следствие, к неверному определению дальнейшей тактики ведения пациентов и значительно снижает показатели общей и безрецидивной выживаемости. Одним из решений сложившейся проблемы может стать использование текстурного анализа [31].

Текстурный анализ / Texture analysis

Радиомика, реализуя принципы прецизионной медицины через лучевую диагностику, является одной из наиболее перспективных областей в онкологии, с развитием которой кардинально меняются взгляды на интерпретацию медицинских изображений. Источником радиомных маркеров становятся также клинические, патоморфологические, генетические исследования.

Радиомный анализ является развивающимся направлением лучевой диагностики и представляет компьютерное извлечение большого числа количе-

ственных характеристик из медицинских изображений. Анализируя данные с учетом конкретного клинического запроса, данный инструмент в перспективе способен стать эффективным помощником в принятии клинических решений [32].

Текстурный анализ изображений позволяет дать объективную характеристику гетерогенности опухоли, характеризуя распределение и взаимосвязь уровней вокселей в изображении [33, 34].

В современных работах авторы сообщают об успешном использовании текстурного анализа в дифференциальной диагностике новообразований, получении дополнительной информации об агрессивности опухоли и прогнозировании ответа на НАХТ до ее начала. Предполагается, что радиомика на основе МРТ может повысить точность оценки терапевтического ответа на НАХТ у пациентов с местнораспространенным РШМ [35–40].

Радиомикологическое моделирование состоит из нескольких этапов: сбор и предварительная обработка данных, выделение контуров опухоли (сегментация изображений), извлечение количественных данных, моделирование, статистическая обработка полученных данных и их валидация [41, 42].

Сегментация является ключевым начальным этапом рабочего процесса, определяя зону интереса, которая будет использована для радиомного анализа; и если ранее этот процесс требовал ручной обработки – специалист лучевой диагностики самостоятельно определял и выделял эту область для последующего анализа, то на сегодняшний день сообщается о достижении полной автоматизации. Автоматическая сегментация может решить основную проблему воспроизводимости исследования между наблюдателями при ручной сегментации, которая также требует существенной затраты временного ресурса [43].

Для выполнения текстурного анализа используются различные пакеты программного обеспечения, позволяющие проводить мультимодальный радиометрический анализ одновременно большого количества медицинских изображений [44, 45].

Радиомика в диагностике в онкогинекологии / Radiomics in oncogynecologic diagnostics

На сегодняшний день радиомика наиболее перспективна в диагностике и прогнозировании лечения онкологических заболеваний и включает в себя преобразование цифровых медицинских изображений в извлекаемые количественные показатели на основе интенсивности сигнала, формы, объема и текстурных особенностей различных локусов как внутри опухоли, так и в окружающих поражение тканях и лимфатических узлах, что позволяет оценить опухолевую гетерогенность [46].

Различия показателей в структуре опухоли на основе радиомики полученных изображений позволяют

повысить диагностическую точность, прогнозировать эффективность лечения, а также появление отдаленных метастазов или локального рецидива заболевания [47].

Таким образом, применение текстурного анализа в онкогинекологии является одним из современных стратегических подходов в диагностике онкологических заболеваний.

Дооперационная стратификация рисков агрессии при карциноме эндометрия крайне важна для планирования лечения. Опубликован ряд работ, продемонстрировавших эффективность применения моделей на основе мультипараметрической МРТ с трехмерным радиомическим анализом изображений в выявлении фенотипов высокого риска: оценка глубины инвазии в миометрий, лимфоваскулярной инвазии, степени дифференцировки опухоли – высокодифференцированная/низкодифференцированная (англ. high/low grade), а также стадии опухолевого процесса [34, 48, 49].

У. Уено с соавт. в публикации 2017 г. сообщили, что при анализе 137 пациенток, перенесших операцию по поводу рака эндометрия, используя 11 признаков, полученных из последовательностей T2-WI, DWI, ИКД и постконтрастных МР-изображений, достигли диагностической точности 81 % в оценке глубины инвазии миометрия [34].

Модель А. Stanzione с соавт., из которой было извлечено 1132 признака, смогла определить глубину инвазии миометрия с точностью 86 % и 91 % и площадью под ROC-кривой 0,92 и 0,94 при тестовой и финальной проверке соответственно [48].

В исследовании М. Мисс с соавт. было извлечено 228 радиомических признаков, и в конечном итоге их количество было ограничено: 38 для оценки инвазии миометрия, 29 для лимфоваскулярной инвазии и 15 для предикции степени дифференцировки опухоли. Текстурный анализ всего объема опухоли продемонстрировал умеренно высокие показатели диагностической эффективности в определении глубины инвазии в миометрий с площадью под кривой рабочих характеристик (англ. area under curve, AUC) 0,85 и 0,68 в группах обучения и валидированной группе соответственно, 0,92 и 0,81 при прогнозировании лимфоваскулярной инвазии, а также 0,84 и 0,76 в стратификации опухолей низкого риска по сравнению с другими степенями дифференцировки (промежуточный/низкий/высокий) [49].

При прогнозировании рака эндометрия низкого риска диагностическая точность составила 0,86, при специфичности 0,93 и отрицательной прогностической значимости 0,89, что говорит о высокой диагностической ценности модели в стратификации предоперационного риска у больных раком эндометрия и позволит в перспективе избегать чрезмерного лечения при аденокарциномах эндометрия с низким по-

тенциалом злокачественности (англ. high grade).

В контексте диагностики новообразований яичников текстурный анализ на основе МРТ позволяет с высокой точностью дифференцировать рак яичников от неэпителиальных злокачественных опухолей.

В ретроспективное когортное исследование M. Cheng с соавт. было включено в общей сложности 148 пациенток с 173 опухолями (81 случай опухоли стромы полового тяжа у 73 пациенток и в 92 случаях – эпителиальные злокачественные опухоли яичника у 75 пациенток), которые были случайным образом разделены на когорты предварительной разработки и финального тестирования в соотношении 8:2. Радиомические признаки были извлечены из каждой опухоли, проведена 5-кратная перекрестная проверка для выбора стабильных признаков в когорте предварительной разработки и построена радиомическая модель на основе этих выбранных признаков. Однофакторный и многофакторный анализы использовались для выявления независимых предикторов клинических признаков и стандартных параметров МРТ для дифференциации стромальных и эпителиальных опухолей. В завершение исследования была построена модель логистической регрессии с использованием 9 признаков, которые продемонстрировали превосходную прогностическую способность с AUC = 0,915 (95 % доверительный интервал (ДИ) = 0,869–0,962) и AUC = 0,867 (95 % ДИ = 0,732–1,000) в когортах предварительной разработки и финального тестирования соответственно. Смешанная модель, в которой сочетались радиомические сигнатуры, традиционные МР-параметры (ИКД) и индекс ROMA (англ. risk of ovarian malignancy algorithm), достигла наилучших диагностических результатов с AUC = 0,934 (95 % ДИ = 0,892–0,976) и AUC = 0,875 (95 % ДИ = 0,743–1,000) соответственно [50].

Применительно к образованиям шейки матки основные направления внедрения радиомного анализа направлены на повышение информативности МРТ в диагностике вторичного поражения лимфоузлов, прогнозирование эффективности противоопухолевого лечения. Так, в исследование M. Fang с соавт. было включено 120 пациенток с РШМ и разработана рентгеномная модель, основанная на признаках, которые показали хорошую эффективность в прогнозировании ответа на ХЛТ у пациенток с местнораспространенными стадиями РШМ. Исследование показало, что 4-я неделя после начала лечения является оптимальной для прогнозирования раннего рецидива РШМ при распространенных стадиях. Прогностическая модель в этом исследовании объединила данные T2-WI и DWI пациенток с распространенным РШМ. Комбинация текстурных параметров T2-WI – неравномерность длины выполнения (англ. Run Length Nonuniformity, RLN) и длительное выделение высокого уровня серого (англ. Long Run High Gray-Level Empha, LRHGE),

рассчитанная на картах ИКД, продемонстрировала наибольшую эффективность (AUC = 0,885), чем каждый из этих показателей по отдельности (AUC = 0,787 и AUC = 0,775, соответственно) [51].

Поражение лимфатических узлов при РШМ является одним из наиболее важных прогностических признаков. Общая 5-летняя выживаемость пациенток при ранних стадиях РШМ без поражения лимфатических узлов составляет 90 %, тогда как у пациенток с пораженными узлами – 65 % [52].

Рекомендации FIGO базируются на проведении двусторонней тазовой лимфодиссекции (англ. pelvic lymph node dissection, PLND) у пациенток с ранними стадиями РШМ по FIGO (IA2, IB1, IIA) [56]. При этом распространенность поражения лимфатических узлов на ранних стадиях болезни оценивается примерно в 15–20 % [53]. Таким образом, значительная часть пациенток подвергается необоснованной процедуре PLND, сопровождающейся риском тяжелых осложнений и ухудшением качества жизни [54, 55]. И хотя биопсия сигнальных лимфатических узлов (англ. sentinel lymph nodes, SLN) таза менее инвазивна по сравнению с PLND и является на сегодняшний день альтернативным методом выявления метастазов в лимфоузлах таза, ее точность все еще зависит от множества факторов – особенностей самой методики, дорогостоящего оборудования, опыта патолога [56]. Кроме того, биопсия сторожевых узлов является инвазивным методом, требующим общего наркоза. Поэтому существует актуальная потребность в поиске неинвазивного и надежного метода для оценки метастатического статуса узлов у пациенток с ранними стадиями болезни.

В исследовании T. Wang с соавт. разрабатывалась одна из первых неинвазивных моделей радиомики на основе мультипараметрического анализа (T2-WI и DWI) для предварительного прогнозирования статуса тазовых лимфоузлов у пациенток с ранними стадиями РШМ перед операцией. Авторами проведен многофакторный логистический регрессионный анализ для создания радиомических и клинических моделей в основной группе пациенток. Радиомическая модель была создана путем интеграции радиомической сигнатуры с клинико-патологическими факторами, в то время как клиническая модель была построена только на основе клинико-патологических факторов. Обе модели прошли предварительную внутрицентровую валидацию. Для предсказания вероятности метастазов в тазовые лимфатические узлы (англ. pelvic lymph node, PLN) были построены радиомическая и клиническая номограммы на основе соответствующих моделей [57]. При этом радиомическая номограмма была построена путем интеграции текстурных характеристик, полученных из базовых последовательностей T2-WI и DWI, которые показали наилучшие результаты для прогнозирования метастазирования

в лимфатические узлы, и клинических данных: возраст, степень опухолевой дифференцировки и статус лимфоузла (рис. 1).

Для сравнения также была построена клиническая номограмма на основе только клинико-патологических предикторов.

Радиомическая и клиническая номограммы показали статистически значимые различия в своей диагностической эффективности – $AUC = 0,893$ (95 % ДИ = 0,817–0,969) и $AUC = 0,616$ (95 % ДИ = 0,468–0,764) соответственно в основной группе и $AUC = 0,922$ (95 % ДИ = 0,825–1,00) и $AUC = 0,799$ (95 % ДИ = 0,599–0,998) в группах при предварительной валидации. Очевидно, что номограмма радиомики демонстрирует значительное улучшение показателей прогнозирования метастазирования в лимфатические узлы по сравнению с клинической номограммой.

Клинико-патологические характеристики отражают качественные и общие особенности опухолей и неизбежно включают субъективное суждение врача и опыт оператора, в то время как радиомические признаки включают количественную информацию в многомерном математическом аспекте и могут отражать гетерогенность и биологическое поведение опухолей, что делает оценку, основанную на радиомических признаках, более объективной и точной. Кроме того, точное преоперационное обнаружение метастазов

в лимфатические узлы с использованием стандартных методов визуализации до сих пор представляет технические сложности: МРТ и мультиспиральная КТ имеют аналогичные ограничения, связанные с малым размером опухоли; единственным признанным критерием для диагностики метастазов в лимфоузлы является то, что короткая ось лимфоузла превышает 1 см, и это ограничение может легко привести к недооценке рисков.

Отличающееся по дизайну исследование A.S. Becker с соавт., опубликованное в 2017 г., посвящено поиску радиомических маркеров для дифференцировки и стадирования РШМ. Двадцать три пациента были включены в это проспективное исследование. МРТ органов малого таза была выполнена на 3-Т МРТ-сканере, протокол исследования включал последовательность DWI со значениями b-фактора 40, 300 и 800 с/мм². Для анализа текстуры в механически выбранной исследователем области интереса (англ. region of interest, ROI) в опухоли, большой ягодичной мышце и подкожно-жировой клетчатке использовали ИКД [58].

В рамках исследования было вычислено 32 текстурных признака из гистограмм и детализированных матриц – матрица совместной встречаемости уровней серого (англ. Gray Level Co-occurrence Matrix, GLCM), матрица длины пробега серых уровней (англ.

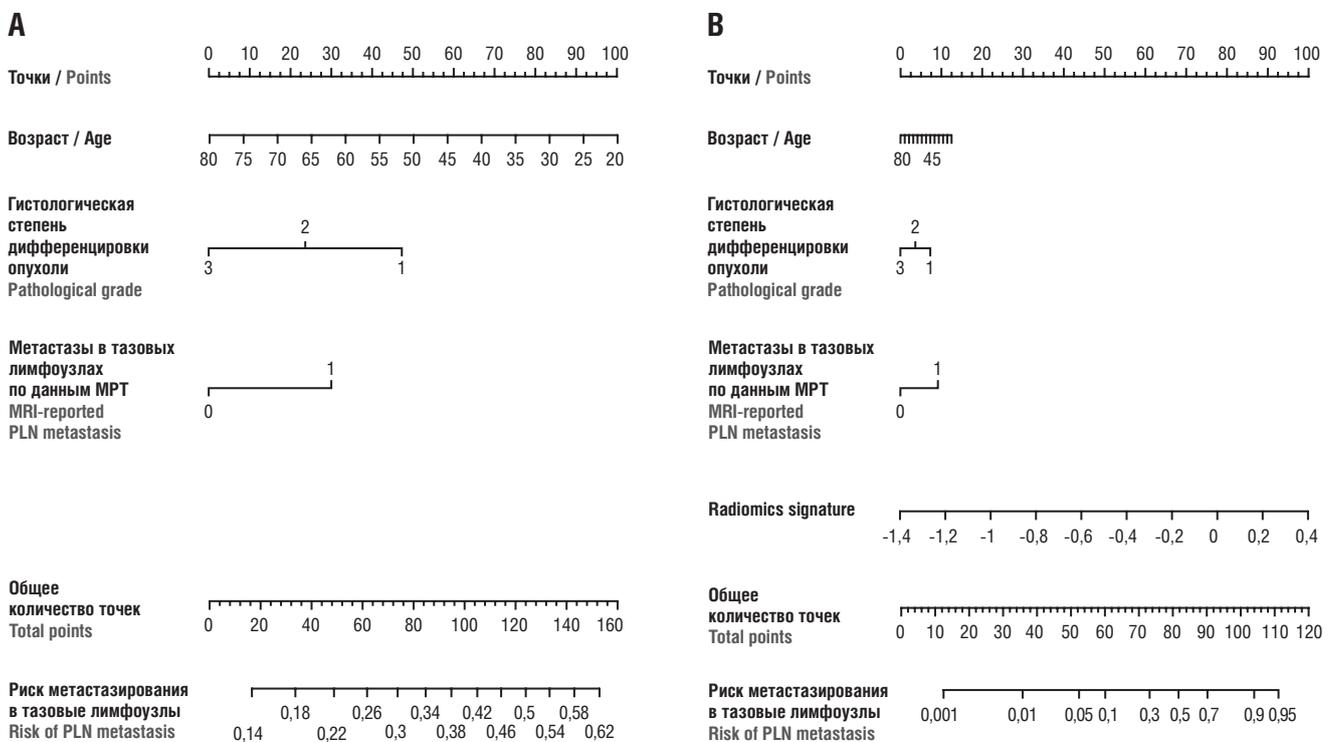


Рисунок 1. Номограммы, разработанные на основе клинических и радиомических характеристик: **А** – номограмма, отражающая клинические характеристики; **В** – номограмма, включающая радиомические характеристики [57].

Примечание: МРТ – магнитно-резонансная томография; PLN – тазовые лимфатические узлы.

Figure 1. Nomograms developed by using clinical and radiomics characteristics: **A** – clinical characteristics-based nomogram; **B** – radiomics characteristics-based nomogram [57].

Note: MRI – magnetic resonance imaging; PLN – pelvic lymph node.

Gray Level Run Length Matrix, GLRLM) и матрица зон размера на уровне серого (англ. Gray Level Size Zone, GLSZM). Выявленные признаки были исследованы на предмет корреляции со степенью дифференцировки опухоли (корреляционный анализ Спирмена) и статусом лимфатических узлов (тест Крускала–Уоллиса). В ходе исследования A.S. Becker с соавт. обнаружили, что с дифференцировкой опухоли статистически значимо коррелировали лишь 3 признака: длительное выделение высокого уровня серого (англ. Long Run High Gray-Level Empha, LRHGE) ($\rho = 0,53$; $p = 0,03$), акцент на большой зоне (англ. Zone percentage, ZP) ($\rho = -0,49$; $p < 0,05$) и акцент на малой зоне (англ. Small zone emphasis, SZE) ($\rho = -0,51$; $p = 0,04$), в то время как ни один из них не коррелировал с гистологическим подтипом или стадией по FIGO. Затем кластерный анализ выявил, что более высокая асимметрия или эксцесс (текстурные параметры первого порядка) были связаны с положительным статусом лимфоузла – 0,65 против 1,08 ($p = 0,04$) и 0,53 против 1,67 ($p = 0,02$) соответственно, из чего авторами был сделан вывод, что LRHGE и эксцесс могут быть использованы в качестве двух независимых маркеров степени дифференцировки опухоли и наличия метастазов в лимфатических узлах соответственно [58]. Неожиданно текстурный анализ не позволил дифференцировать гистологический тип опухоли. Учитывая относительно небольшой размер выборки, использованной в этом пилотном исследовании, было бы преждевременно делать какие-либо выводы из этого отрицательного результата; тем не менее, возможно, что в конечном счете, другие маркеры визуализации могут превосходить радиомические признаки для предсказания гистологического типа (такие как параметры перфузии, полученные при количественном анализе мультипараметрической МРТ).

Целью исследования X.-X. Li с соавт. было изучение диагностической ценности комбинации количественных параметров мультипараметрической МРТ с перфузионным протоколом, определяемых в опухоли, и текстурных признаков на основе T2-WI для прогнозирования параметриальной инвазии. После предварительной оценки 62 пациентки с гистопатологически подтвержденным РШМ (25–56 лет, средний возраст 45 лет) отвечали всем критериям включения в исследование (27 с параметриальной инвазией и 35 без инвазии), включая стадию IA по FIGO ($n = 14$), IB ($n = 9$), IIA ($n = 12$), IIB ($n = 15$), IIIA ($n = 7$) и IIIB ($n = 5$). На предоперационном этапе всем пациенткам выполнялась DCE-MPT с постпроцессинговой обработкой полученных изображений и построением перфузионных карт для последующей количественной оценки параметров перфузии в опухоли: объемный коэффициент переноса из кровеносного сосуда во внеклеточный матрикс (англ. volumetric transfer coefficient, K^{trans}), коэффициент, определяющий обратное пере-

распределение контрастного препарата между кровеносным сосудом и внеклеточным внесосудистым пространством (англ. the rate constant, K_{ep}) и внеклеточное объемное соотношение (англ. extracellular volume, V_e) [59]. В результате ROC-анализа были установлены пороговые значения (cut-off) для наиболее информативных визуализационных и текстурных показателей для оценки параметриальной инвазии: пороговое значение $K^{trans} \geq 0,286 \text{ мин}^{-1}$ может стать оптимальным порогом для установления вовлеченности в процесс параметриальной клетчатки и использоваться в клинической практике (AUC = 0,788; чувствительность = 0,839; специфичность = 0,657).

Среди параметров текстурного анализа наилучшую диагностическую эффективность показали энергия и энтропия. Энергия отражает однородность и фактурность изображений. Чем мягче распределен серый цвет изображения, тем выше его значение. Энтропия, отражающая степень хаотичности уровней серого, является также эффективной мерой информации в изображении и используется для оценки однородности текстуры изображения. В исследовании X.-X. Li с соавт. пороговое значение Энергии составило $\leq 0,488$ (AUC = 0,761; чувствительность = 0,710; специфичность = 0,714) и Энтропии $\geq 1,387$ (AUC = 0,749; чувствительность = 0,581; специфичность = 0,943). Для оценки диагностической эффективности комбинаций количественных показателей в исследовании была построена модель логистической регрессии, проведена оценка ее информативности (ROC-анализ). Наиболее информативной предикторной комбинацией (с AUC = 0,727, чувствительностью 0,806 и специфичностью 0,657) является K^{trans} + Энтропия. По своей диагностической эффективности она превзошла комбинированное использование K^{trans} + Энергия (AUC = 0,727, чувствительность = 0,806, специфичность = 0,657) и Энтропия + Энергия (AUC = 0,619, чувствительность = 0,548, специфичность = 0,771, соответственно). Наиболее информативной в оценке инвазии явилась комбинация всех трех параметров – K^{trans} + Энтропия + Энергия (AUC = 0,925, чувствительность = 0,935, специфичность = 0,829), что обосновывает сочетанное применение мультипараметрической МРТ и текстурного анализа в рамках предоперационного обследования пациенток [59].

Таким образом, значение энтропии в группе с параметриальной инфильтрацией было выше, чем в группе без инфильтрации, что указывало на то, что распределение пикселей изображения в группе с инфильтрацией было более дискретным и неупорядоченным. Причина такой разницы может быть связана со степенью дифференцировки опухоли. В нескольких исследованиях показано, что опухоли с высокой степенью злокачественности обладают высокой гетерогенностью, что и отражает высокое значение энтропии в низкодифференцированных карциномах

[60]. Другими словами, мультипараметрическая МРТ, представляющая количественную перфузионную информацию на молекулярном уровне, и особенности текстуры, представляющие собой математическую модель оценки распределения и взаимосвязи уровней пикселей или вокселей серого в изображении, являются одним из наиболее перспективных сочетаний для диагностики РШМ с параметральной инфильтрацией. Вышеизложенное открывает новые возможности использования более точных количественных параметров на микроскопическом уровне вместо того, чтобы ставить субъективный диагноз по данным лишь клинического осмотра с большой погрешностью для оценки параметральной инфильтрации. Количественные параметры могут использоваться в качестве важного вспомогательного диагностического инструмента для рутинного МРТ-обследования и могут служить ориентиром для создания модели прогнозирования РШМ, степени агрессии и ответа на химиотерапию с помощью искусственного интеллекта.

Заключение / Conclusion

Таким образом, точная и своевременная диагностика злокачественных опухолей определяет успех лечения и улучшает прогноз заболевания. Визуализационная диагностика – один из наиболее значимых этапов, позволяющий неинвазивно оценить характеристики опухоли и степень распространенности процесса. Полученные цифровые изображения опухоли отражают ее анатомические и функциональные изменения. Учитывая активное внедрение «машинной» обработки изображений в последние годы, радиомика является перспективной областью постпроцессинга, и ее развитие может способствовать повышению воспроизводимости и точности использования «больших данных»: от технических аспектов непосредственно к клиническим исходам, дополняя фундаментальные знания о биологии опухоли и ее молекулярном окружении, позволяя разработать персонализированные стратегии лечения на основе прогнозирования ответа опухоли на терапию.

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ	ARTICLE INFORMATION
Поступила: 11.07.2023. В доработанном виде: 18.08.2023.	Received: 11.07.2023. Revision received: 18.08.2023.
Принята к печати: 24.08.2023. Опубликовано: 30.08.2023.	Accepted: 24.08.2023. Published: 30.08.2023.
Вклад авторов	Author's contribution
Все авторы внесли равный вклад в написание и подготовку рукописи.	All authors contributed equally to the article.
Все авторы прочитали и утвердили окончательный вариант рукописи.	All authors have read and approved the final version of the manuscript.
Конфликт интересов	Conflict of interests
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.	The authors declare no conflict to interests.
Финансирование	Funding
Работа выполнена в рамках реализации гранта «Разработка технологии объективной оценки потенциала опухолевой прогрессии при раке шейки матки с целью создания новых подходов к изучению индивидуальных патогенетических механизмов возникновения резистентности к терапии с помощью количественных методов визуализации, поиска маркеров эффективности лечения с применением математического моделирования на реальных клинических данных» Российского научного фонда № 23-25-00445 от 24.01.2023.	The work was carried out as a part of the Russian Science Foundation grant "Development of technology to assess putative tumor progression in cervical cancer for proposing new approaches to investigate individual pathogenetic mechanisms of therapeutic resistance by using quantitative imaging methods, a search for signs of therapeutic effectiveness based on mathematical modeling of real-life clinical data" (No. 23-25-00445 dated of 24.01.2023).
Происхождение статьи и рецензирование	Provenance and peer review
Журнал не заказывал статью; внешнее рецензирование.	Not commissioned; externally peer reviewed.

Литература / References:

- Bray F., Ferlay J., Soerjomataram I. et al. Global cancer statistics 2018: GLOBOCAN estimates of incidence and mortality worldwide for 36 cancers in 185 countries. *CA Cancer J Clin.* 2018;68(6):394–424. <https://doi.org/10.3322/caac.21492>.
- Pecorelli S. Revised FIGO staging for carcinoma of the vulva, cervix, and endometrium. *Int J Gynaecol Obstet.* 2009;105(2):103–4. <https://doi.org/10.1016/j.ijgo.2009.02.012>.
- Petsuksiri J., Jaishuen A., Pattaranutaporn P., Chansilpa Y. Advanced imaging applications for locally advanced cervical cancer. *Asian Pacific J Cancer Prev.* 2012;13(5):1713–8. <https://doi.org/10.7314/APJCP.2012.13.5.1713>.
- Bhatla N., Aoki D., Sharma D.N., Sankaranarayanan R. Cancer of the cervix uteri. *Int J Gynecol Obstet.* 2018;143 Suppl 2:22–36. <https://doi.org/10.1002/ijgo.12611>.
- Sala E., Rockall A.G., Freeman S.J. et al. The added role of MR imaging in treatment stratification of patients with gynecologic malignancies: what the radiologist needs to know. *Radiology.* 2013;266(3):717–40. <https://doi.org/10.1148/radiol.12120315>.
- Gui B., Miccò M., Valentini A.L. et al. Prospective multimodal imaging assessment of locally advanced cervical cancer patients administered by chemoradiation followed by radical surgery – the "PRICE" study 2: role of conventional and DW-MRI. *Eur Radiol.* 2019;29(4):2045–57. <https://doi.org/10.1007/s00330-018-5768-5>.
- Valentini A.L., Miccò M., Gui B. et al. The PRICE study: The role of conventional and diffusion-weighted magnetic resonance imaging in assessment of locally advanced cervical cancer patients administered by chemoradiation followed by radical surgery. *Eur Radiol.* 2018;28(6):2425–35. <https://doi.org/10.1007/s00330-017-5233-x>.
- Jalaguier-Coudray A., Villard-Mahjoub R., Delouche A. et al. Value of dynamic contrast-enhanced and diffusion-weighted MR imaging in the detection of pathologic complete response in cervical cancer after neoadjuvant therapy: A retrospective observational

- study. *Radiology*. 2017;284(2):432–42. <https://doi.org/10.1148/radiol.2017161299>.
9. Schreuder S.M., Lensing R., Stoker J., Bipat S. Monitoring treatment response in patients undergoing chemoradiotherapy for locally advanced uterine cervical cancer by additional diffusion-weighted imaging: A systematic review. *J Magn Reson Imaging*. 2015;42(3):572–94. <https://doi.org/10.1002/jmri.24784>.
 10. Lambin P., Rios-Velazquez E., Leijenar R. et al. Radiomics: extracting more Information from medical images using advanced feature analysis. *Eur J Cancer*. 2012;48(4):441–6. <https://doi.org/10.1016/j.ejca.2011.11.036>.
 11. Lucia F., Visvikis D., Desserot M.-C. et al. Prediction of outcome using pretreatment 18F-FDG PET/CT and MRI radiomics in locally advanced cervical cancer treated with chemoradiotherapy. *Eur J Nucl Med Mol Imaging*. 2018;45(5):768–86. <https://doi.org/10.1007/s00259-017-3898-7>.
 12. Torheim T., Groendahl A.R., Andersen E.K.F. et al. Cluster analysis of dynamic contrast enhanced MRI reveals tumor subregions related to locoregional relapse for cervical cancer patients. *Acta Oncol*. 2016;55(11):1294–8. <https://doi.org/10.1080/0284186X.2016.1189091>.
 13. Koh W.-J., Abu-Rustum N.R., Bean S. et al. Cervical Cancer, Version 3.2019, NCCN Clinical Practice Guidelines in Oncology. *J Natl Compr Canc Netw*. 2019;17(1):64–84. <https://doi.org/10.6004/jnccn.2019.0001>.
 14. Quinn M.A., Benedet J.L., Odicino F. et al. Carcinoma of the cervix uteri. FIGO 26th annual report on the results of treatment in gynecological cancer. *Int J Gynaecol Obstet*. 2006;95 Suppl 1:S43–103. [https://doi.org/10.1016/S0020-7292\(06\)60030-1](https://doi.org/10.1016/S0020-7292(06)60030-1).
 15. Guan Y., Li W., Jiang Z. et al. Whole-lesion apparent Diffusion coefficient-based entropy-related parameters for characterizing cervical cancers: initial findings. *Acad Radiol*. 2016;23(12):1559–67. <https://doi.org/10.1016/j.acra.2016.08.010>.
 16. Neoadjuvant Chemotherapy for Locally Advanced Cervical Cancer Meta-analysis Collaboration. Neoadjuvant chemotherapy for locally advanced cervical cancer: a systematic review and meta-analysis of individual patient data from 21 randomised trials. *Eur J Cancer*. 2003;39(17):2470–86. [https://doi.org/10.1016/s0959-8049\(03\)00425-8](https://doi.org/10.1016/s0959-8049(03)00425-8).
 17. Michel G., Morice P., Castaigne D. et al. Lymphatic spread in stage Ib and II cervical carcinoma: anatomy and surgical implications. *Obstet Gynecol*. 1998;91(3):360–3. [https://doi.org/10.1016/s0029-7844\(97\)00696-0](https://doi.org/10.1016/s0029-7844(97)00696-0).
 18. Bhatla N., Berek J.S., Fredes M.C. et al. Revised FIGO staging for carcinoma of the cervix uteri. *Int J Gynaecol Obstet*. 2019;145(1):129–35. <https://doi.org/10.1002/ijgo.12749>.
 19. Manganaro L., Lakhman Y., Bharwani N. et al. Staging, recurrence and follow-up of uterine cervical cancer using MRI: updated Guidelines of the European Society of Urogenital Radiology after revised FIGO staging 2018. *Eur Radiol*. 2021;31(10):7802–16. <https://doi.org/10.1007/s00330-020-07632-9>.
 20. Rockall A.G., Ghosh S., Alexander-Sefre F. et al. Can MRI rule out bladder and rectal invasion in cervical cancer to help select patients for limited EUA. *Gynecol Oncol*. 2006;101(2):244–9. <https://doi.org/10.1016/j.ygyno.2005.10.012>.
 21. Kwee T.C., Takahara T., Ochiai R. et al. Diffusion-weighted whole-body imaging with background body signal suppression (DWIBS): features and potential applications in oncology. *Eur Radiol*. 2008;18(9):1937–52. <https://doi.org/10.1007/s00330-008-0968-z>.
 22. Koh D.M., Collins D.J. Diffusion-weighted MRI in the body: applications and challenges in oncology. *AJR Am J Roentgenol*. 2007;188(6):1622–35. <https://doi.org/10.2214/AJR.06.1403>.
 23. Figueiras R.G., Goh V., Padhani A.R. et al. The role of functional imaging in colorectal cancer. *AJR Am J Roentgenol*. 2010;195(1):54–66. <https://doi.org/10.2214/AJR.10.4422>.
 24. Kuang F., Ren J., Zhong Q. et al. The value of apparent diffusion coefficient in the assessment of cervical cancer. *Eur Radiol*. 2013;23(4):1050–8. <https://doi.org/10.1007/s00330-012-2681-1>.
 25. Liu Y., Bai R., Sun H. et al. Diffusion weighted imaging in predicting and monitoring the response of uterine cervical cancer to combined chemoradiation. *Clin Radiol*. 2009;64(11):1067–74. <https://doi.org/10.1016/j.crad.2009.07.010>.
 26. Chen Y.B., Hu C.M., Chen G.L. et al. Staging of uterine cervical carcinoma: whole body diffusion-weighted magnetic resonance imaging. *Abdom Imaging*. 2011;36(5):619–26. <https://doi.org/10.1007/s00261-010-9642-4>.
 27. Qi Y.-F., He Y.-L., Lin C.-Y. et al. Diffusion-weighted imaging of cervical cancer: feasibility of ultra-high b-value at 3T. *Eur J Radiol*. 2020;124:108779. <https://doi.org/10.1016/j.ejrad.2019.108779>.
 28. Chung H.H., Kang S.-B., Cho J.Y. et al. Can preoperative MRI accurately evaluate nodal and parametrial invasion in early stage cervical cancer? *Jpn J Clin Oncol*. 2007;37(5):370–5. <https://doi.org/10.1093/jco/hym036>.
 29. Kim S.H., Han M.C. Invasion of the urinary bladder by uterine cervical carcinoma: evaluation with MR imaging. *AJR Am J Roentgenol*. 1997;168(2):393–7. <https://doi.org/10.2214/ajr.168.2.9016214>.
 30. Mirestean C.C., Pagute O., Buzea C. et al. Radiomic machine learning and texture analysis – new horizons for head and neck oncology. *Maedica (Bucur)*. 2019;14(2):126–30. <https://doi.org/10.26574/maedica.2019.14.2.126>.
 31. Giganti F., Antunes S., Salerno A. et al. Gastric cancer: texture analysis from multidetector computed tomography as a potential preoperative prognostic biomarker. *Eur Radiol*. 2017;27(5):1831–9. <https://doi.org/10.1007/s00330-016-4540-y>.
 32. Beig N., Khorrami M., Alilou M. et al. Perinodular and intranodular radiomic features on lung CT images distinguish adenocarcinomas from granulomas. *Radiology*. 2019;290(3):783–92. <https://doi.org/10.1148/radiol.2018180910>.
 33. Sidhu H.S., Benigno S., Ganeshan B. et al. Textural analysis of multiparametric MRI detects transition zone prostate cancer. *Eur Radiol*. 2017;27(6):2348–58. <https://doi.org/10.1007/s00330-016-4579-9>.
 34. Ueno Y., Forghani B., Forghani R. et al. Endometrial carcinoma: MR imaging-based texture model for preoperative risk stratification – a preliminary analysis. *Radiology*. 2017;284(3):748–57. <https://doi.org/10.1148/radiol.2017161950>.
 35. Lakhman Y., Veeraraghavan H., Chaim J. et al. Differentiation of uterine leiomyosarcoma from atypical leiomyoma: diagnostic accuracy of qualitative MR imaging features and feasibility of texture analysis. *Eur Radiol*. 2017;27(7):2903–15. <https://doi.org/10.1007/s00330-016-4623-9>.
 36. De Cecco C.N., Ciolina M., Caruso D. et al. Performance of diffusion-weighted imaging, perfusion imaging, and texture analysis in predicting tumoral response to neoadjuvant chemoradiotherapy in rectal cancer patients studied with 3T MR: initial experience. *Abdom Radiol (NY)*. 2016;41(9):1728–35. <https://doi.org/10.1007/s00261-016-0733-8>.
 37. Liu Z., Zhang X.Y., Shi Y.J. et al. Radiomics analysis for evaluation of pathological complete response to neoadjuvant chemoradiotherapy in locally advanced rectal cancer. *Clin Cancer Res*. 2017;23(23):7253–62. <https://doi.org/10.1158/1078-0432.CCR-17-1038>.
 38. Gardin I., Grégoire V., Gibon D. et al. Radiomics: principles and radiotherapy applications. *Crit Rev Oncol Hematol*. 2019;138:44–50. <https://doi.org/10.1016/j.critrevonc.2019.03.015>.
 39. Chaddad A., Kucharczyk M.J., Daniel P. et al. Radiomics in glioblastoma: current status and challenges facing clinical implementation. *Front Oncol*. 2019;9:374. <https://doi.org/10.3389/fonc.2019.00374>.
 40. van Velden F.H., Kramer G.M., Frings V. et al. Repeatability of radiomic features in non-small-cell lung cancer [18F]FDG-PET/CT studies: impact of reconstruction and delineation. *Mol Imaging Biol*. 2016;18(5):788–95. <https://doi.org/10.1007/s11307-016-0940-2>.
 41. Nioche C., Orhac F., Boughdad S. et al. LIFEx: a freeware for radiomic feature calculation in multimodality imaging to accelerate advances in the characterization of tumor heterogeneity. *Cancer Res*. 2018;78(16):4786–9. <https://doi.org/10.1158/0008-5472.can-18-0125>.
 42. Zhang L., Fried D.V., Fave X.J. et al. IBEX: an open infrastructure software platform to facilitate collaborative work in radiomics. *Med Phys*. 2015;42(3):1341–53. <https://doi.org/10.1118/1.4908210>.
 43. Wu J., Tha K.K., Xing L., Li R. Radiomics and radiogenomics for precision radiotherapy. *J Radiat Res*. 2018;59(suppl_1):i25–i31. <https://doi.org/10.1093/jrr/rrx102>.
 44. Coroller T.P., Grossmann P., Hou Y. et al. CT-based radiomic signature predicts distant metastasis in lung adenocarcinoma. *Radiother Oncol*. 2015;114(3):345–50. <https://doi.org/10.1016/j.radonc.2015.02.015>.
 45. Mattonen S.A., Palma D.A., Johnson C. et al. Detection of local cancer recurrence after stereotactic ablative radiation therapy for lung cancer: physician performance versus radiomic assessment. *Int J Radiat Oncol Biol Phys*. 2016;94(5):1121–8. <https://doi.org/10.1016/j.ijrobp.2015.12.369>.
 46. Cook G.J., Yip C., Siddique M. et al. Are pretreatment 18F-FDG PET tumor textural features in non-small cell lung cancer associated with response and survival after chemoradiotherapy? *J Nucl Med*. 2013;54(1):19–26. <https://doi.org/10.2967/jnumed.112.107375>.
 47. Huang Y., Liu Z., He L. et al. Radiomics signature: a potential biomarker for the prediction of disease-free survival in early-stage (I or II) non-small

- cell lung cancer. *Radiology*. 2016;281(3):947–57. <https://doi.org/10.1148/radiol.2016152234>.
48. Stanzione A., Cuocolo R., Del Grosso R. et al. Deep myometrial infiltration of endometrial cancer on MRI: a radiomics-powered machine learning pilot study. *Acad Radiol*. 2021;28(5):737–44. <https://doi.org/10.1016/j.acra.2020.02.028>.
 49. Miccò M., Gui B., Russo L. et al. Preoperative tumor texture analysis on MRI for high-risk disease prediction in endometrial cancer: a hypothesis-generating study. *J Pers Med*. 2022;12(11):1854. <https://doi.org/10.3390/jpm12111854>.
 50. Cheng M., Tan S., Ren T. et al. Magnetic resonance imaging radiomics to differentiate ovarian sex cord-stromal tumors and primary epithelial ovarian cancers. *Front Oncol*. 2023;12:1073983. <https://doi.org/10.3389/fonc.2022.1073983>.
 51. Fang M., Kan Y., Dong D. et al. Multi-habitat based radiomics for the prediction of treatment response to concurrent chemotherapy and radiation therapy in locally advanced cervical cancer. *Front Oncol*. 2020;10:563. <https://doi.org/10.3389/fonc.2020.00563>.
 52. Gien L., Gien L.T., Covens A. Lymph node assessment in cervical cancer: prognostic and therapeutic implications. *J Surg Oncol*. 2009;99(4):242–47. <https://doi.org/10.1002/jso.21199>.
 53. Small W., Bacon M.A., Bajaj A. et al. Cervical cancer: a global health crisis. *Cancer*. 2017;123(13):2404–12. <https://doi.org/10.1002/cncr.30667>.
 54. Ferrandina G., Anchora L.P., Gallotta V. et al. Can we define the risk of lymph node metastasis in early-stage cervical cancer patients? A large-scale, retrospective study. *Ann Surg Oncol*. 2017;24(8):2311–8. <https://doi.org/10.1245/s10434-017-5917-0>.
 55. Macdonald M.C., Tidy J.A. Can we be less radical with surgery for early cervical cancer? *Curr Oncol Rep*. 2016;18(3):16. <https://doi.org/10.1007/s11912-016-0501-5>.
 56. Kadkhodayan S., Hasanzadeh M., Treglia G. et al. Sentinel node biopsy for lymph nodal staging of uterine cervix cancer: a systematic review and meta-analysis of the pertinent literature. *Eur J Surg Oncol*. 2015;41(1):1–20. <https://doi.org/10.1016/j.ejso.2014.09.010>.
 57. Wang T., Gao T., Yang J. et al. Preoperative prediction of pelvic lymph nodes metastasis in early-stage cervical cancer using radiomics nomogram developed based on T2-weighted MRI and diffusion-weighted imaging. *Eur J Radiol*. 2019;114:128–35. <https://doi.org/10.1016/j.ejrad.2019.01.003>.
 58. Becker A.S., Ghafoor S., Marcon M. et al. MRI texture features may predict differentiation and nodal stage of cervical cancer: a pilot study. *Acta Radiol Open*. 2017;6(10):205846011772957. <https://doi.org/10.1177/2058460117729574>.
 59. Li X.-X., Lin T.-T., Liu B., Wei W. Diagnosis of cervical cancer with parametrial invasion on whole-tumor dynamic contrast-enhanced magnetic resonance imaging combined with whole-lesion texture analysis based on T2-weighted images. *Front Bioeng Biotechnol*. 2020;8:590. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2020.00590>.
 60. Avanzo M., Stancanello J., El Naqa I. Beyond imaging: the promise of radiomics. *Phys Med*. 2017;38:122–39. <https://doi.org/10.1016/j.ejmp.2017.05.071>.

Сведения об авторах:

Солопова Алина Евгеньевна – д.м.н., ведущий научный сотрудник отдела лучевой диагностики ФГБУ «Национальный медицинский исследовательский центр акушерства, гинекологии и перинатологии имени академика В.И. Кулакова» Министерства здравоохранения Российской Федерации, Москва, Россия; профессор кафедры акушерства, гинекологии и перинатальной медицины Клинического института детского здоровья имени Н.Ф. Филатова ФГАОУ ВО Первый Московский государственный медицинский университет имени И.М. Сеченова Министерства здравоохранения Российской Федерации (Сеченовский университет), Москва, Россия. E-mail: dr.solopova@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4768-115X>. Scopus Author ID: 24460923200. Researcher ID: P-8659-2015.

Носова Юлия Витальевна – к.м.н., врач-специалист отделения акушерства и гинекологии, Саудовско-немецкий госпиталь, Дубай, Объединенные Арабские Эмираты. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9810-3029>.

Бендженова Бова Батнасановна – врач акушер-гинеколог, онколог гинекологического отделения ГБУЗ «Городская клиническая больница имени С.П. Боткина Департамента здравоохранения города Москвы», Москва, Россия.

About the authors:

Alina E. Solopova – MD, Dr Sci Med, Leading Researcher, Radiology Department, Academician Kulakov National Medical Research Center for Obstetrics, Gynecology and Perinatology, Moscow, Russia; Professor, Department of Obstetrics, Gynecology and Perinatal Medicine, Filatov Clinical Institute of Children's Health, Sechenov University, Moscow, Russia. E-mail: dr.solopova@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4768-115X>. Scopus Author ID: 24460923200. Researcher ID: P-8659-2015.

Julia V. Nosova – MD, PhD, Specialist in Obstetrics and Gynecology Department, Saudi German Hospital, Dubai, United Arab Emirates. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9810-3029>.

Bova B. Bendzhenova – MD, Obstetrician-Gynecologist, Oncologist, Gynecological Department, Botkin City Clinical Hospital, Moscow, Russia.