



# Радиомика в диагностике узловых образований щитовидной железы

**Токмачева А.А.<sup>1</sup>, Вялкин Д.С.<sup>2</sup>, Троц А.А.<sup>3</sup>, Тараканова Е.Е.<sup>1</sup>,  
Давлетова Ю.И.<sup>1</sup>, Абдуллина Э.Л.<sup>1</sup>, Степанадзе В.Б.<sup>4</sup>, Ахметова А.И.<sup>1</sup>,  
Шагиева Н.Э.<sup>1</sup>, Ускова В.Д.<sup>1</sup>, Коновалова В.С.<sup>1</sup>, Магданова А.Р.<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> ФГБОУ ВО «Башкирский государственный медицинский университет» Минздрава России,  
ул. Ленина, 3, Уфа, 450008, Российская Федерация

<sup>2</sup> ФГБОУ ВО «Воронежский государственный медицинский университет им. Н.Н. Бурденко» Минздрава России,  
ул. Студенческая, 10, Воронеж, 394036, Российская Федерация

<sup>3</sup> ФГБОУ ВО «Ростовский государственный медицинский университет» Минздрава России,  
пер. Нахичеванский, 29, Ростов-на-Дону, 344022, Российская Федерация

<sup>4</sup> ФГБОУ ВО «Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова»,  
Московский пр-т, 15, Чебоксары, 428015, Российская Федерация

**Токмачева Ангелина Алексеевна**, ассистент кафедры ФГБОУ ВО «Башкирский государственный медицинский университет» Минздрава России;  
<https://orcid.org/0009-0006-2708-0305>

**Вялкин Дмитрий Сергеевич**, ассистент кафедры ФГБОУ ВО «Воронежский государственный медицинский университет им. Н.Н. Бурденко» Минздрава России;  
<https://orcid.org/0009-0001-6668-8544>

**Троц Алина Алексеевна**, ординатор ФГБОУ ВО «Ростовский государственный медицинский университет» Минздрава России;  
<https://orcid.org/0009-0002-4901-3382>

**Тараканова Елизавета Евгеньевна**, студентка ФГБОУ ВО «Башкирский государственный медицинский университет» Минздрава России;  
<https://orcid.org/0000-0002-3753-3412>

**Давлетова Юлия Ильдаровна**, студентка ФГБОУ ВО «Башкирский государственный медицинский университет» Минздрава России;  
<https://orcid.org/0000-0003-1967-7487>

**Абдуллина Элина Ленаровна**, студентка ФГБОУ ВО «Башкирский государственный медицинский университет» Минздрава России;  
<https://orcid.org/0000-0003-0016-3312>

**Степанадзе Вахтанг Бежанович**, студент ФГБОУ ВО «Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова»;  
<https://orcid.org/0000-0002-4586-2021>

**Ахметова Альмира Ильгамовна**, ординатор кафедры ФГБОУ ВО «Башкирский государственный медицинский университет» Минздрава России;  
<https://orcid.org/0009-0003-0385-209X>

**Шагиева Нурия Эльвировна**, студентка ФГБОУ ВО «Башкирский государственный медицинский университет» Минздрава России;  
<https://orcid.org/0000-0003-0119-4516>

**Ускова Варвара Дмитриевна**, студентка ФГБОУ ВО «Башкирский государственный медицинский университет» Минздрава России;  
<https://orcid.org/0000-0003-2225-5218>

**Коновалова Виктория Сергеевна**, студентка ФГБОУ ВО «Башкирский государственный медицинский университет» Минздрава России;  
<https://orcid.org/0000-0001-9497-0419>

**Магданова Айгуль Рустановна** – студентка ФГБОУ ВО «Башкирский государственный медицинский университет» Минздрава России;  
<https://orcid.org/0000-0002-3753-3412>

## Резюме

Узлы щитовидной железы (УЩЖ) широко распространены во всем мире: по данным патологоанатомических исследований, их могут иметь от 50% до 60% взрослых. В настоящее время в клинике для диагностики УЩЖ обычно используются ультразвуковое исследование, компьютерная томография, магнитно-резонансная томография и радионуклидная диагностика (например, позитронно-эмиссионная томография, совмещенная с компьютерной томографией). Эти методы в основном применяются для диагностики доброкачественности и злокачественности узлов, степени инвазии в прилегающие ткани и метастазирования в лимфатические узлы. Благодаря развитию искусственного интеллекта, машинного обучения и усовершенствованию оборудования для медицинской визуализации в последние годы популярным направлением исследований стала радиомика. Она позволяет получать из медицинских изображений различные количественные характеристики, выделяя невидимые черты и значительно расширяя возможности идентификации и прогнозирования. Радиомика обладает высоким потенциалом в выявлении и прогнозировании УЩЖ. В статье представлена информация о разработке и рабочем

процессе радиомики. Обобщены данные о применении различных методов визуализации для выявления доброкачественных и злокачественных УЩЖ, оценки инвазивности и метастазирования в лимфатические узлы, а также о некоторых новых достижениях в области молекулярного уровня и глубокого обучения. Также приведены недостатки методики радиомики и перспективы ее дальнейшего развития.

**Ключевые слова:** узлы щитовидной железы; рак щитовидной железы; радиомика; компьютерная томография; магнитно-резонансная томография; ультразвуковое исследование; искусственный интеллект; обзор.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Для цитирования:** Токмачева А.А., Вялкин Д.С., Троц А.А., Тараканова Е.Е., Давлетова Ю.И., Абдуллина Э.Л., Степанадзе В.Б., Ахметова А.И., Шагиева Н.Э., Ускова В.Д., Коновалова В.С. Радиомика в диагностике узловых образований щитовидной железы. *Вестник рентгенологии и радиологии*. 2023; 104(4): 270–8. <https://doi.org/10.20862/0042-4676-2023-104-4-270-278>

**Для корреспонденции:** Токмачева Ангелина Алексеевна, E-mail: [vkomissiya@inbox.ru](mailto:vkomissiya@inbox.ru)

Статья поступила 06.04.2023

После доработки 04.10.2023

Принята к печати 05.12.2023

## Radiomics in the Diagnosis of Thyroid Nodules

**Angelina A. Tokmacheva<sup>1</sup>, Dmitry S. Vyalkin<sup>2</sup>, Alina A. Trots<sup>3</sup>, Elizaveta E. Tarakanova<sup>1</sup>, Yulia I. Davletova<sup>1</sup>, Elina L. Abdullina<sup>1</sup>, Vakhtang B. Stepnadze<sup>4</sup>, Almira I. Akhmetova<sup>1</sup>, Nuriya E. Shagieva<sup>1</sup>, Varvara D. Uskova<sup>1</sup>, Victoria S. Konovalova<sup>1</sup>, Aigul R. Magdanova<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Bashkir State Medical University,  
ul. Lenina, 3, Ufa, 450008, Russian Federation

<sup>2</sup> Burdenko Voronezh State Medical University,  
ul. Studencheskaya, 10, Voronezh, 394036, Russian Federation

<sup>3</sup> Rostov State Medical University  
Nakhichevskiy pereulok, 29, Rostov-on-Don, 344022, Russian Federation

<sup>4</sup> Ulyanov Chuvash State University,  
Moskovskiy prospekt, 15, Cheboksary, 428015, Russian Federation

**Angelina A. Tokmacheva**, Assistant Professor, Bashkir State Medical University;  
<https://orcid.org/0009-0006-2708-0305>

**Dmitry S. Vyalkin**, Assistant Professor, Burdenko Voronezh State Medical University;  
<https://orcid.org/0009-0001-6668-8544>

**Alina A. Trots**, Resident, Rostov State Medical University;  
<https://orcid.org/0009-0002-4901-3382>

**Elizaveta E. Tarakanova**, Student, Bashkir State Medical University;  
<https://orcid.org/0000-0002-3753-3412>

**Yulia I. Davletova**, Student, Bashkir State Medical University;  
<https://orcid.org/0000-0003-1967-7487>

**Elina L. Abdullina**, Student, Bashkir State Medical University;  
<https://orcid.org/0000-0003-0016-3312>

**Vakhtang B. Stepnadze**, Student, Ulyanov Chuvash State University;  
<https://orcid.org/0000-0002-4586-2021>

**Almira I. Akhmetova**, Resident, Bashkir State Medical University;  
<https://orcid.org/0009-0003-0385-209X>

**Nuriya E. Shagieva**, Student, Bashkir State Medical University;  
<https://orcid.org/0000-0003-0119-4516>

**Varvara D. Uskova**, Student, Bashkir State Medical University;  
<https://orcid.org/0000-0003-2225-5218>

**Victoria S. Konovalova**, Student, Bashkir State Medical University;  
<https://orcid.org/0000-0001-9497-0419>

**Aigul R. Magdanova**, Student, Bashkir State Medical University;  
<https://orcid.org/0000-0002-3753-3412>

### Abstract

The thyroid nodules (TNs) are widespread throughout the world: according to the pathological studies, they can be found in 50–60% of adults. Currently, ultrasound, computed tomography, magnetic resonance imaging and radionuclide diagnostics, such as positron emission tomography with computed tomography, are usually used to diagnose TNs in clinic. These techniques are mainly used to diagnose the nodule benignity and malignancy, the degree of invasion into adjacent tissues and metastases to lymph nodes. Thanks to

the development of artificial intelligence, machine learning and the improvement of medical imaging equipment, radiomics has become a popular area of research in recent years. It allows to obtain various quantitative characteristics from medical images, highlighting invisible features and significantly expanding the possibilities of identifying and predicting. Radiomics has a high potential in detecting and predicting TNs. We present the information on the development and workflow of radiomics. The article summarizes the application of various imaging techniques to identify benign and malignant TNs, determine invasiveness and metastases to lymph nodes, as well as some new advances in the field of molecular level and deep learning. The disadvantages of radiomics method are also given as well as prospects for its further development.

**Keywords:** thyroid nodules; thyroid cancer; radiomics; computed tomography; magnetic resonance imaging; ultrasound; artificial intelligence; review.

**Conflict of interest.** The authors declare no conflict of interest.

**For citation:** Tokmacheva AA, Vyalkin DS, Trots AA, Tarakanova EE, Davletova Yul, Abdullina EL, Stepnadze VB, Akhmetova AI, Shagieva NE, Uskova VD, Konovalova VS. Radiomics in the diagnosis of thyroid nodules. *Journal of Radiology and Nuclear Medicine*. 2023; 104(4): 270–8 (in Russian). <https://doi.org/10.20862/0042-4676-2023-104-4-270-278>

**For corresponding:** Angelina A. Tokmacheva, E-mail: [vkomissiya@inbox.ru](mailto:vkomissiya@inbox.ru)

Received April 6, 2023

Revised October 4, 2023

Accepted December 5, 2023

## Введение / Introduction

Узлы щитовидной железы (УЩЖ) широко распространены во всем мире: по данным патолого-анатомических исследований, их могут иметь от 50% до 60% взрослых [1]. Доброкачественные УЩЖ без хирургических показаний, как правило, не требуют специального лечения. Напротив, злокачественные УЩЖ должны подвергаться плановому хирургическому лечению после установления диагноза, а при наличии метастазов в лимфатических узлах следует выполнять шейную диссекцию.

Рак щитовидной железы (РЩЖ) является наиболее распространенным злокачественным новообразованием эндокринной системы [2]. В общей структуре онкологической заболеваемости в Российской Федерации в 2020 г. он составил 2,1% (2019 г. – 2,2%; 2008 г. – 1,8%), что подтверждает постоянный рост числа больных с этой патологией в последние годы с соотношением 4,7:1 между женским и мужским населением [3]. Наиболее распространенный его тип – папиллярный рак щитовидной железы (ПРЩЖ), который довольно часто имеет благоприятный прогноз, однако в случае рецидивов прогноз неблагоприятный. В 10–15% случаев ПРЩЖ является рецидивирующим и имеет агрессивные характеристики, включая экстра-тироидную инвазию, латеральное метастазирование в лимфатические узлы шеи, резистентность к терапии и отдаленные метастазы [4].

Медицинская визуализация стала обычной клинической практикой для получения информации о характеристиках тканей человека неинвазивным и воспроизводимым способом. Для диагностики УЩЖ обычно используются ультразвуковое исследование (УЗИ), компьютерная томография (КТ), магнитно-резонансная томография (МРТ) и радионуклидная диагностика (например,

позитронно-эмиссионная томография, совмещенная с КТ).

Однако текущая стратификация риска для диагностической визуализации УЩЖ субъективна, так как в значительной степени она зависит от эмпирического суждения клинициста и в различных изображениях содержится большое количество неиспользованной цифровой информации. Многие исследователи пытались разработать объективные методы, в том числе модели искусственного интеллекта (ИИ), для извлечения ранее не использованных данных в изображениях, чтобы помочь решить эту проблему.

## Применение радиомики в диагностике и лечении УЩЖ / Radiomics in TNs diagnosis and treatment

### Дифференциальная диагностика доброкачественных и злокачественных новообразований

*Ультразвуковое исследование.* С постоянным совершенствованием УЗИ-инструментов применение высокочастотного ультразвука к малым органам стало неотъемлемой частью неинвазивной диагностики [5]. Благодаря высокой чувствительности, безопасности, простоте и скорости УЗИ является методом выбора для скрининга УЩЖ. В рекомендациях Американской ассоциации щитовидной железы (American Thyroid Association, ATA) 2015 г. подчеркивается важность УЗИ для этих целей [6]. В последние годы предложены новые методы, такие как УЗИ с контрастным усилением и УЗ-эластография, чтобы значительно повысить точность диагностики УЩЖ [7, 8]. Большинство исследований было сосредоточено на разработке радиомических показателей с использованием УЗИ-изображений и их изучении в качестве допол-

нительного инструмента повышения эффективности систем стратификации риска.

J. Liang et al. провели радиомический анализ УЗИ-изображений и сравнили их со стандартами оценки Американского колледжа радиологии (American College of Radiology, ACR) TI-RADS<sup>1</sup>. Ультразвуковая радиомика показала хорошую дискриминационную и прогностическую ценность, а анализ кривой принятия решения продемонстрировал, что модель, использующая оценку радиомики, дает больше преимуществ, чем модель оценки ACR [9].

В работе J. Yoon et al. использовался многомерный логистический регрессионный анализ для создания двух моделей прогнозирования: одна основана на клинических переменных, а другая – на клинических переменных в сочетании с радиомикой. Результаты показали, что площадь под кривой (area under curve, AUC) прогностической модели, состоящей из клинических переменных и радиометрической оценки, была значительно выше, чем у модели, состоящей только из клинических переменных (0,839 против 0,583) [10].

Y. Shi et al. осуществили аналогичный эксперимент и создали три модели: модель группового обучения клинической визуализации, объединенную модель группы клинической визуализации и комбинированные изображения с номограммами. Авторы пришли к выводу, что совместная модель клинической визуализации omics имеет более высокую прогностическую ценность и чистую эффективность, чем две другие [11].

*Магнитно-резонансная томография* имеет высокое контрастное разрешение, обеспечивает хорошую визуализацию мягких тканей и может быть всесторонней, многоугольной и многоплоскостной для дифференциальной диагностики УЩЖ, при этом отсутствует ионизирующее излучение по сравнению с КТ. МРТ является наиболее чувствительным методом визуализации для диагностики ранних метастатических заболеваний печени и головного мозга. Метод также обычно используется для определения степени поражения костного мозга при злокачественных новообразованиях костей. Однако из-за длительного времени работы, артефактов движения и других проблем МРТ редко применяется для диагностики УЩЖ.

Q. Wang et al. использовали диффузионно-взвешенную визуализацию с высоким значением b-фактора, анализ основных компонентов (principal component analysis, PCA) и коэффициент корреляции Пирсона для уменьшения размер-

ности и построили десять моделей: SVM (support vector machines), скрытое распределение Дирихле (latent Dirichlet distribution, LDA), автокодировщик (autoencoder, AE), «случайный лес» (random forest, RF), логистическая регрессия (logistic regression, LR), LASSO (least absolute shrinkage and selection operator), дерево решений, генное программирование и наивный байесовский анализ. Авторы оценивали чувствительность, специфичность, точность и четыре индекса AUC. Для стандартизации применяли NormUnit, для уменьшения размерности – PCA, для скрининга собственных значений – ANOVA (analysis of variance). В результате было выбрано 15 собственных значений; дифференциально-диагностический эффект модели оказался лучшим, точность составила 85,71%, чувствительность – 80,00%, специфичность – 100,00%, AUC – 0,925 [12].

L. Xia et al. выбрали T2-взвешенные изображения (T2-ВИ) и изображения с измеряемым коэффициентом диффузии (apparent diffusion coefficient, ADC). Авторы применили факторный анализ для проверки функций, а затем дополнительно отфильтровали указанные выше функции для построения модели SVM. Точность модели составила 88%, чувствительность – 98%, специфичность – 80%, AUC – 0,92. Всего было проверено 15 признаков, разделенных на общие, морфологические и текстурные, связанные с пространственным распределением, включая GLZLM (grey level zone length matrix), GLRLM (gray level run length matrix) и т.д. С точки зрения важности признаков модели опорных векторов с полиномиальной функцией ядра характеристики CONVENTIONAL\_Q2 в изображениях ADC и CONVENTIONAL-Q3 имеют большое значение для распознавания ПРЩЖ. В то же время CONVENTIONAL\_std-t является наиболее важной недавно обнаруженной характеристикой T2-ВИ для дифференциации узлового зоба от ПРЩЖ [13].

*Компьютерная томография.* Узловые образования щитовидной железы могут быть обнаружены случайно при проведении КТ или МРТ по другим показаниям. УЩЖ выявляются примерно в 16% случаев при КТ органов грудной клетки. КТ с контрастным усилением может показать характерное усиление контрастности щитовидной железы, узлов и окружающих тканей, что имеет большое значение для качественной диагностики узловых образований. Использование КТ-изображений позволяет избежать ошибок УЗИ, ассоциированных с субъективностью исследования. Кроме того, стандартизация изображения выше, а обученная модель обладает более выраженной способностью к обобщению.

Y. Wu et al. идентифицировали доброкачественные и злокачественные УЩЖ на основании однослойных КТ-изображений в артериальную

<sup>1</sup> TI-RADS (Thyroid Imaging Reporting and Data System) – система описания и обработки данных лучевых исследований щитовидной железы.

фазу с контрастным усилением и исключили очаги кальцификации и кистозного некроза. Обнаружено, что значения текстурных признаков на основе GLCM (gray level co-occurrence matrix) значительно различаются между доброкачественными и злокачественными узлами, а чувствительность и специфичность выше, когда граничное значение энтропии равно 5,00 [14].

Тем не менее W. Guo et al. не исключили кистозный некроз и кальцификации узлов при зарисовке областей интереса с помощью однослойных изображений с КТ-усилением. Результаты показали, что эффективность дифференциальной диагностики выше при использовании энтропии 6,09 в качестве граничного значения [15]. Энтропия является наиболее объективной характеристикой параметра текстуры, отражающей сложность и неоднородность внутренней структуры опухоли. Значение пикселя представляет количество пикселей, содержащихся в изображении. Чем оно выше, тем четче будет изображение. Асимметрия, пиковое состояние и стандартное отклонение отражают распределение значений пикселей.

Используя метод измерения объема, Y. Hu et al. извлекли значения признаков 3D-текстуры улучшенных КТ-изображений 41 УЩЖ, включая асимметрию, эксцесс, энтропию, неоднородность, стандартное отклонение и среднюю интенсивность. Среди них разница в энтропии между доброкачественными и злокачественными УЩЖ была очевидной; значение энтропии выше 3,79 указывало на то, что узлы с большей вероятностью злокачественны [16].

D. Zhang et al. собрали и проанализировали данные 203 пациентов с микроузлами щитовидной железы и использовали уменьшение размерности LASSO Logistic для анализа и сравнения шести моделей: RF, SVM, KNN (k-nearest neighbor), дерево решений, байесовский анализ и Logistic. Авторы оценивали точность, специфичность, чувствительность и AUC дифференциальной диагностики доброкачественных и злокачественных микро-УЩЖ на разных моделях. Сделан вывод, что усиленное КТ-изображение на основе модели RF обладает наибольшей диагностической эффективностью УЩЖ [17].

D. Du et al. применили тот же метод для выявления аденомы щитовидной железы и ПРЩЖ размером более 1 см. Были построены шесть моделей радиомики, включая RF, SVM, KNN, дерево решений и Logistic. Точность, специфичность и чувствительность каждой модели в дифференциальной диагностике доброкачественных и злокачественных микро-УЩЖ были выше, чем результаты обычных расширенных КТ-исследований. Простая КТ и улучшенная модель визуализации RF имели бо-

лее высокую ценность в дифференциальной диагностике ПРЩЖ и многоузлового зоба [18].

В приведенных выше исследованиях обсуждалась возможность создания омической модели визуализации на основе существующих КТ-изображений пациентов в соответствии с эффективностью модели для повышения диагностической точности клиницистов при дифференциации доброкачественных и злокачественных УЩЖ и максимизации ценности КТ-исследования щитовидной железы.

### **Оценка инвазии и метастазирования в лимфатические узлы**

Хотя ПРЩЖ считается индолентной опухолью, некоторые раковые клетки метастазируют в лимфатические узлы, окружающие щитовидную железу, в основном в центральные и латеральные шейные лимфатические узлы. Однако чрезмерная диссекция лимфатических узлов приведет к развитию осложнений. Чем больше объем хирургического вмешательства, тем выше вероятность таких осложнений, как повреждение надгортанного нерва, возвратных гортанных нервов и парамедианных нервов, перманентный гипопаратиреоз и т.д. Таким образом, предоперационная оценка метастазирования в лимфатические узлы является важным показателем прогноза, объема и тактики хирургического вмешательства по поводу РЩЖ. Точная предоперационная диагностика метастазов в лимфатические УЩЖ имеет решающее значение для определения стадии и индивидуального плана лечения.

*Ультразвуковое исследование.* Существует два способа диагностики метастазирования в шейные лимфатические узлы. Один основан на изображении первичного поражения, а другой – на изображении метастатического лимфатического узла. Хотя более точно предсказать инвазивность ПРЩЖ возможно путем извлечения радиомических характеристик метастатических лимфатических узлов, частота их обнаружения низка и существуют ограничения. Таким образом, большинство моделей прогнозирования определяют инвазивность на основе ультразвуковых радиомических характеристик первичного ПРЩЖ.

В исследовании S. Zhou et al. точность, чувствительность и специфичность при определении метастатических лимфатических узлов на основе характеристик первичного ПРЩЖ составили 0,731, 0,714 и 0,74 соответственно, что было намного выше по сравнению с двухмерным УЗИ в обычных исследованиях [19].

Некоторые авторы дополнительно проанализировали ультразвуковую радиомику в сочетании с номограммой. X. Wang et al. разделили пациентов на группу с экстратиреоидным распространением

и группу без него в соответствии с результатами гистологического исследования, установили радиомическую номограмму и оценили ее точность и клиническую применимость. Анализ кривой решения показал, что номограмма ультразвуковой радиомики имеет хорошее клиническое прикладное значение [20].

Y. Tong et al. использовали тот же метод для построения номограммы на основе изображений метастатических лимфатических узлов [21]. Был сделан вывод о том, что признаки радиомики значительно коррелировали с метастазами в латеральные шейные лимфатические узлы в двух группах ( $p < 0,001$ ). Обучающий и проверочный наборы данных демонстрируют хорошие возможности распознавания и калибровки, а AUC составляет 0,946 и 0,914 соответственно.

*МРТ-исследование.* У многих больных РЩЖ эффективность МРТ шеи и средостения напрямую не сравнивалась с КТ. МРТ часто применяется в качестве метода визуализации второй линии у пациентов с неизвестными образованиями, выявленными при КТ-исследовании, чтобы лучше их охарактеризовать. Существует много работ, посвященных оценке метастазирования в шейные лимфатические узлы на основе МРТ, в большинстве из которых рассматриваются центральные лимфатические узлы.

Однако в некоторых ранних исследованиях текстура использовалась только для статистического анализа. Например, H. Zhang et al. применили метод текстурного анализа гистограммы первого порядка и GLCM второго порядка для анализа текстуры изображений на этапе T2-ВИ и извлекли 9 параметров текстуры [22]. Авторы обнаружили, что энтропия, стандартное отклонение, корреляция и угловой момент второго порядка значительно различались у пациентов с ПРЩЖ и метастазами в шейных лимфатических узлах и у больных с ПРЩЖ без метастазов. Энтропия отражает неравномерность текстуры изображения, и чем сложнее текстура, тем больше энтропия. Угловой момент второго порядка, также известный как энергия, представляет собой сумму квадратов значений элементов GLCM, отражающих однородность распределения серого изображения и толщины текстуры. Чем больше значение, тем более однородным является изображение.

X. Yao et al. применили аналогичный метод для анализа более значительного числа T2-ВИ и выбрали 8 параметров текстуры, среди которых энтропия, секундный угловой момент и корреляция были статистически значимыми, за исключением стандартного отклонения [23]. Это согласовывалось с результатами исследования H. Zhang et al. [22].

H. Qin et al. отобрали омические характеристики 109 T2-ВИ; оптимальные характеристики определялись с помощью корреляционного теста Спирмена, проверки гипотез и метода «случайного леса». Авторы построили 8 диагностических моделей. Достоверность модели была подтверждена ROC-анализом (receiver operating characteristic – рабочая характеристика приемника). По результатам исследования был сделан вывод, что комбинированная модель имеет лучшую диагностическую эффективность при оценке метастазов ПРЩЖ в лимфатические узлы [24].

*КТ-исследование.* Визуализирующие исследования, такие как КТ и МРТ, также помогают врачам оценить метастазы в лимфатических узлах перед операцией, особенно в областях, которые трудно оценить с помощью УЗИ (например, задняя часть глотки, средостение и нижние яремные лимфатические узлы). Хирург должен знать место поражения, морфологическую плотность, инвазию капсулы и метастазы УЩЖ в лимфатические узлы.

S. Shen et al. использовали технологию вейвлет-преобразования для анализа КТ-изображений венозной фазы у пациентов с РЩЖ. Результаты показали, что чувствительность определения метастазов в центральные лимфатические узлы в обучающей и контрольной группах составила 62,84% и 64,95% соответственно. Параметр SALGLE (small area low grey level emphasis) может использоваться в качестве независимого предиктора факторов риска [25].

G.Y. Su et al. ретроспективно проанализировали КТ-изображения артериальной и венозной фаз у 27 пациентов с метастазами РЩЖ в латеральные лимфатические узлы шеи и 32 пациентов с метастазами РЩЖ в нелатеральные лимфатические узлы шеи, применив ROC-анализ и множественный логистический регрессионный анализ. Основываясь на анализе гистограммы GLCM, авторы сделали вывод, что эксцесс имеет лучшую диагностическую площадь AUC (0,884) и специфичность (92,59%). И наоборот, средняя интенсивность серого цвета имела наилучшую диагностическую чувствительность (90,62%). Средняя интенсивность серого в артериальной фазе ( $p = 0,006$ ; отношение рисков (OR) 24,297) и эксцесс в венозной фазе ( $p = 0,014$ ; OR 19,651) были независимыми предикторами метастазов в шейные лимфатические узлы [26].

J. He et al. ретроспективно оценили обычные и КТ-изображения с контрастным усилением у 197 пациентов с ПРЩЖ и отобрали 107 признаков простой, артериальной и венозной фаз. Метод SelectKBest в Python использовался для построения алгоритма RF [27]. Авторы заключили, что особенности визуализации трех указанных стадий могут определить наличие метастазов

в лимфатических узлах, а эффективность простого сканирования лучше, чем в артериальной и венозной фазах.

H. Zhao et al. ретроспективно проанализировали 173 лимфатических узла с помощью простой КТ и двухфазной КТ с контрастным усилением. Из них 89 были метастатическими и 84 неметастатическими. Авторы использовали алгоритм языка R, встроенный в платформу научных исследований Дарвина. Для анализа алгоритма были отобраны 6 признаков артериальной фазы и 5 признаков венозной фазы, показавших наибольшую эффективность [28].

Y. Zhou et al. ретроспективно изучили результаты двухэнергетической КТ (ДЭКТ) 255 лимфатических узлов (143 неметастатических и 112 метастатических). Используя уменьшение размерности данных LASSO, логистическое моделирование и анализ решений по номограмме, авторы пришли к выводу, что анализ изображений ДЭКТ превосходит возможности КТ в предоперационной диагностике метастазов шейных лимфатических узлов у пациентов с ПРЩЖ [29].

### **Глубокое обучение**

Что касается глубокого обучения, Y. Zhou et al. разработали базовую модель сверточной нейронной сети (convolutional neural network, CNN), модель трансферного обучения (transfer learning, TL) и новую модель под названием «радиомика глубокого обучения щитовидной железы» (deep learning radiomics of thyroid, DLRT) и сравнили их с данными врачей-рентгенологов. Результаты показали, что AUC трех указанных моделей радиомики больше, чем у рентгенологов [29]. Общая производительность DLRT является наиболее высокой.

H. Zhou et al. разработали модели классификатора на основе искусственной нейронной сети и SVM [30]. Авторы ретроспективно оценивали УЗИ-снимки 348 узлов у 340 пациентов. Два опытных рентгенолога независимо друг от друга просмотрели каждое изображение и классифицировали узлы в соответствии с рекомендациями ATA 2015 г. Отнесение узла к категории крайне подозрительных считалось положительным диагнозом злокачественности. Узлы были сегментированы вручную, и из каждой интересующей области было выделено 96 рентгенологических признаков. Десять значимых признаков были выбраны и используются в качестве конечных входных переменных в разработанных моделях классификатора, основанных на искусственной нейронной сети и SVM. Были рассчитаны и сопоставлены диагностические показатели рентгенологов и обеих моделей классификатора. Чувствительность, специфичность и точность моделей, основанных на нейронной сети и SVM, составили 32,3%, 90,1% и 74,1%

и 41,7%, 79,4% и 69,0% соответственно, в то время как те же показатели у рентгенологов – 24,0%, 84,0% и 64,8%.

### **Проблемы радиомики и пути их решения / Problems of radiomics and ways to solve them**

Большинство исследований, посвященных радиомике, являются ретроспективными, одноцентровыми и включают небольшую выборку. В будущем необходимо проведение проспективных многоцентровых исследований с большой выборкой, чтобы подтвердить эффективность радиомики и использовать в качестве диагностического инструмента УЩЖ.

Как правило, исследователи делят зону интереса только на максимальное поперечное сечение узлов. Необходимо усилить анализ гетерогенности всей опухоли. Поэтому в дальнейших работах важно принять метод сегментации с хорошей повторяемостью и высокой надежностью. Недавно был использован трехмерный текстурный анализ, который отображает поражения в каждом слое опухоли. Данный метод в значительной степени позволяет избежать субъективизма врачей, а измеренные значения более стабильны и полностью отражают гетерогенность опухолей. Исследования показали, что значения ADC, рассчитанные с помощью полнообъемной области интереса, имеют более высокую диагностическую эффективность, чем значения, рассчитанные с помощью однослойной области исследования твердого компонента.

### **Отсутствие единых стандартов радиомики**

Исследователи в области радиомики должны найти компромисс между объемом данных и спецификацией включения, чтобы гарантировать существенный объем данных и поддерживать изучение больших выборок, множественных признаков, последовательностей и методов. Поэтому необходимо создание открытой базы данных научных исследований. Базы могут связывать огромные объемы радиомикологических данных от миллионов пациентов для формирования обширных сетей быстрого обучения. Тем не менее существуют также значительные препятствия для управления данными.

### **Проблема «черного ящика»**

Обученные модели алгоритмов обычно обладают высокой точностью, но из-за сложности данных алгоритма мы не можем иметь глубокого понимания внутренней работы этих моделей и возникают необъяснимые проблемы «черного ящика». Традиционные медицинские решения основаны на знании патофизиологии, но без понимания основополагающих принципов врачам и пациентам трудно их принять.

Кроме того, без биологических экспериментов и клинических исследований регулирующим органам сложно одобрить применение диагностических инструментов на основе ИИ. В модели отсутствует интерпретируемость, и она не может оценить важность каждой функции для результата прогнозирования, не говоря уже о том, чтобы объяснить, существует ли интерактивная связь между отдельными элементами.

Поэтому еще есть возможности для совершенствования применения ИИ. Он не может полностью заменить врачей в процессе диагностики и лечения пациентов. Непрозрачность алгоритма «черного ящика» сочетается с многими этическими проблемами, которые стали предметом исследований.

## Заключение / Conclusion

Хотя радиомика все еще сталкивается со многими проблемами на пути к широкому использованию в клинической практике, преимущества высокой воспроизводимости и простоты реализации указывают на то, что она имеет большой потенциал для клинического применения. Радиомика может предоставить дополнительные рекомендации по диагностике, лечению и прогнозированию заболеваний щитовидной железы за счет углубленного анализа информации изображений. Важным направлением будущего развития радиомики является поиск проверенного и надежного алгоритма после многократного тестирования и уточнения в проспективных многоцентровых исследованиях с большой выборкой, что закладывает прочную основу для прецизионной медицины.

## Литература [References]

1. Миронов С.П., Сергиенко В.Б. Сцинтиграфия при узловой патологии щитовидной железы. Вестник рентгенологии и радиологии. 2022; 103(4–6): 108–16. <https://doi.org/10.20862/0042-4676-2022-103-4-6-108-116>. [Mironov SP, Sergienko VB. Scintigraphy in thyroid nodular pathology. Journal of Radiology and Nuclear Medicine. 2022; 103(4–6): 108–16 (in Russ). <https://doi.org/10.20862/0042-4676-2022-103-4-6-108-116>.]
2. Станякина Е.Е., Романов И.С., Гогиева Э.Х. и др. Эффективность метода определения уровня тиреоглобулина в смыве из пункционной иглы в дифференциальной диагностике метастазов высокодифференцированного рака щитовидной железы в лимфатических узлах шеи. Опухоли головы и шеи. 2022; 12(3): 10–6. <https://doi.org/10.17650/2222-1468-2022-12-3-10-16>. [Stanyakina EE, Romanov IS, Gogieva EK, et al. The effectiveness of the method for determining the level of thyroglobulin in needle washouts of fine-needle aspiration biopsy in the differential diagnosis of metastases of highly differentiated thyroid cancer in the lymph nodes of the neck. Head and Neck Tumors. 2022; 12(3): 10–6 (in Russ). <https://doi.org/10.17650/2222-1468-2022-12-3-10-16>.]
3. Гордиенко В.П., Побережский А.В. Эпидемиологическая характеристика рака щитовидной железы у жителей восточных регионов Российской Федерации. Тихоокеанский медицинский журнал. 2022; 4: 63–71. <https://doi.org/10.34215/1609-1175-2022-4-63-71>. [Gordienko VP, Poberezhstsky AV. Thyroid cancer in the Far Eastern Federal District of Russia. Pacific Medical Journal. 2022; 4: 63–71 (in Russ). <https://doi.org/10.34215/1609-1175-2022-4-63-71>.]
4. Gul M, Bonjoc KC, Gorlin D, et al. Diagnostic utility of radiomics in thyroid and head and neck cancers. Front Oncol. 2021; 11: 639326. <https://doi.org/10.3389/fonc.2021.639326>.
5. Sun L, Li M. TSH suppression therapy may affect bone health. How to manage differentiated thyroid cancer scientifically? Chinese General Practice. 2021; 24(8): 941–6. <https://doi.org/10.12114/j.issn.1007-9572.2021.00.074>.
6. Grani G, Sponziello M, Pecce V, et al. Contemporary thyroid nodule evaluation and management. J Clin Endocrinol Metab. 2020; 105(9): 2869–83. <https://doi.org/10.1210/clinem/dgaa322>.
7. Tessler FN, Middleton WD, Grant EG, et al. ACR Thyroid Imaging, Reporting and Data System (TI-RADS): White Paper of the ACR TI-RADS Committee. J Am Coll Radiol. 2017; 14(5): 587–95. <https://doi.org/10.1016/j.jacr.2017.01.046>.
8. Fresilli D, David E, Pacini P, et al. Thyroid nodule characterization: how to assess the malignancy risk. Update of the literature. Diagnostics (Basel). 2021; 11(8): 1374. <https://doi.org/10.3390/diagnostics11081374>.
9. Liang J, Huang X, Hu H, et al. Predicting malignancy in thyroid nodules: radiomics score versus 2017 American College of Radiology thyroid imaging, reporting and data system. Thyroid. 2018; 28(8): 1024–33. <https://doi.org/10.1089/thy.2017.0525>.
10. Yoon J, Lee E, Kang SW, et al. Implications of US radiomics signature for predicting malignancy in thyroid nodules with indeterminate cytology. Eur Radiol. 2021; 31(7): 5059–67. <https://doi.org/10.1007/s00330-020-07670-3>.
11. Shi Y, Jiang Y, Wang J, et al. Prediction of benign and malignant nodules of thyroid TI-RADS 4–5 based on ultrasonographic nomogram. Chin J Ultrasound Med. 2021; 37(12): 1328–32.
12. Wang Q, Shi Q, Xian X, et al. Application of machine learning in differential diagnosis of nodular hashimoto thyroiditis and thyroid micropapillary carcinoma based on small sample thyroid high b-value diffusion-weighted imaging omics. Chin J Med Imaging. 2021; 29(11): 1064–9.
13. Xia L, Liang Z, Yao G, et al. Value of support vector machine model based on magnetic resonance texture analysis for differential diagnosis of thyroid nodule larger than 1 cm. Shandong Med J. 2021; 61(31): 77–80.
14. Wu Y, Jin J, Feng Y. Analysis of the texture features of enhanced CT in the identification of benign and malignant thyroid nodules. J Southeast Univ (Medical Edition). 2016; 35(1): 112–6.

15. Guo W, Luo H, Zhao Y, et al. CT texture analysis technology to identify benign and malignant thyroid nodules feasibility study. *Int J Med Radiol.* 2017; 40(1): 3–5.
16. Hu Y, Huang Z, Xie Y, Wang X. Value of first-order ct texture analysis in differentiating benign and malignant thyroid nodules. *J Clin Radiol.* 2019; 38(3): 422–5.
17. Zhang DAW. Differential diagnosis of benign and malignant thyroid micronodules based on CT image omics. *Anhui Medical University.* 2020; 56(4): 652655.
18. Du D, Li X, Liu B, et al. CT image omics of thyroid adenoma and the diagnostic value of papillary carcinoma. *J Anhui Med Univ.* 2019; 54(6): 950–3.
19. Zhou S, Liu T, Zhou J. Preliminary study on application of radiomics in thyroid carcinoma. *Oncoradiology.* 2017; 26(2): 102–5.
20. Wang X, Agyekum EA, Ren Y, et al. A radiomic nomogram for the ultrasound-based evaluation of extrathyroidal extension in papillary thyroid carcinoma. *Front Oncol.* 2021; 11: 625646. <https://doi.org/10.3389/fonc.2021.625646>.
21. Tong Y, Li J, Huang Y, et al. Ultrasound-based radiomic nomogram for predicting lateral cervical lymph node metastasis in papillary thyroid carcinoma. *Acad Radiol.* 2021; 28(12): 1675–84. <https://doi.org/10.1016/j.acra.2020.07.017>.
22. Zhang H, Zhang H, Shu Z, et al. The value of MRI T2WI image texture analysis in predicting cervical lymph node metastasis of thyroid papillary carcinoma. *Chin J Clin Imaging.* 2020; 31(8): 568–71.
23. Yao X, Zhou Q, Zhang Z, Zhou J. Value of MRI texture combined with cripto-1 and SOX2 proteins in the diagnosis of cervical lymph node metastasis of thyroid papillary carcinoma. *Chin J Med Phys.* 2022; 39(2): 224–8.
24. Qin H, Que Q, Lin P, et al. Magnetic resonance imaging (MRI) radiomics of papillary thyroid cancer (PTC): a comparison of predictive performance of multiple classifiers modeling to identify cervical lymph node metastases before surgery. *Radiol Med.* 2021; 126(10): 1312–7. <https://doi.org/10.1007/s11547-021-01393-1>.
25. Shen S, Han D, Zhao L, et al. Prediction of lymph node metastasis in the central group based on small ripple analysis of CT venous phase image of thyroid papillary carcinoma nodules. *Chin J Radiol.* 2019; 11: 946–51.
26. Su GY, Xu XQ, Zhou Y, et al. Texture analysis of dual-phase contrast-enhanced CT in the diagnosis of cervical lymph node metastasis in patients with papillary thyroid cancer. *Acta Radiol.* 2021; 62(7): 890–6. <https://doi.org/10.1177/0284185120946711>.
27. He J, Lu Q, Xu X, Hu S. Study on the value of CT imaging features in predicting cervical lymph node metastasis of papillary thyroid. *J Shanghai Jiao Tong Univ (Medical Science).* 2021; 41(9): 1233–9.
28. Zhao H, Ye J, Duan S, et al. CT image omics of thyroid papillary carcinoma and adenoma identify. *Chin J Med Imaging.* 2021; 27(2): 102–6.
29. Zhou Y, Su GY, Hu H, Ge YQ. Diagnosis of cervical lymph node metastasis of papillary thyroid carcinoma based on dual energy CT iodogram. *J Int Med Radiol.* 2021; 44(1): 119.
30. Zhou H, Jin Y, Dai L, et al. Differential diagnosis of benign and malignant thyroid nodules using deep learning radiomics of thyroid ultrasound images. *Eur J Radiol.* 2020; 127: 108992. <https://doi.org/10.1016/j.ejrad.2020.10899>.