Статья поступила: 06.02.2026
Статья принята: 20.02.2026
Тип статьи: Структурированный нарративный обзор
УДК: 616.24-006.6:616-073:004.9
МРНТИ: 76.29.51; 76.29.49
DOI: 10.24412/1609-8692-2026-1-38-49

РАДИОМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МОЛЕКУЛЯРНОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ КАК ПОТЕНЦИАЛЬНЫЕ ЦИФРОВЫЕ БИОМАРКЕРЫ РИСКА МЕТАСТАЗИРОВАНИЯ ПРИ НЕМЕЛКОКЛЕТОЧНОМ РАКЕ ЛЕГКОГО

Садыкова Айнур Ермеккызы[1]*, Аманкулов Жандос Мухтарович[2]
[1] ГКП на ПХВ «Городская центральная поликлиника», Алматы, Казахстан
[2] Казахский научно-исследовательский институт онкологии и радиологии, Алматы, Казахстан
** Автор, ответственный за корреспонденцию*

Введение. Немелкоклеточный рак легкого (НМРЛ) характеризуется высокой частотой лимфогенного и отдаленного метастазирования. Стандартные КТ и 18F-ФДГ-ПЭТ/КТ имеют ограничения при выявлении микрометастазов и оценке биологической гетерогенности опухоли, что поддерживает интерес к количественному анализу изображений.
Цель. Систематизировать данные о радиомических характеристиках КТ и 18F-ФДГ-ПЭТ/КТ как потенциальных цифровых биомаркерах риска поражения лимфатических узлов, отдаленного метастазирования и рецидива при НМРЛ.
Материалы и методы. Выполнен структурированный нарративный обзор публикаций 2020-2026 гг. Поиск проводили в PubMed с использованием терминов radiomics, metastasis, NSCLC, CT, PET/CT, machine learning и deep learning. Рассматривались оригинальные исследования у пациентов с НМРЛ, оценивавшие радиомические или радиомико-клинические модели прогнозирования метастазов, рецидива и связанных исходов; методологические обзоры использовали для контекстуальной оценки. Из 117 выявленных публикаций 40 были включены в качественный синтез.
Результаты. Основные направления включали прогнозирование поражения лимфатических узлов, метастазов в головной мозг и кости, рецидива после хирургического и лучевого лечения, а также мультимодальные модели, объединяющие КТ, ПЭТ/КТ и клинические признаки. Во многих работах комбинированные модели демонстрировали более высокую дискриминацию, чем модели на основе одной области интереса или только клинических данных. Однако преобладали ретроспективные одноцентровые исследования с внутренней валидацией.
Обсуждение. Результаты подтверждают биологическую информативность интра- и перитуморальных признаков, но их клиническая переносимость ограничена вариабельностью протоколов визуализации, сегментации, отбора признаков и алгоритмов машинного обучения, риском переобучения и недостатком независимой внешней валидации.
Заключение. Радиомика может дополнять стандартное стадирование и риск-стратификацию НМРЛ, но пока не должна заменять морфологическую верификацию, инвазивное стадирование и клиническое решение мультидисциплинарной команды. Для внедрения необходимы стандартизированные протоколы, проспективные многоцентровые исследования и оценка клинической пользы.
Ключевые слова: немелкоклеточный рак легкого; метастазирование; радиомика; компьютерная томография; 18F-ФДГ-ПЭТ/КТ; машинное обучение; цифровые биомаркеры.

RADIOMIC CHARACTERISTICS OF MOLECULAR IMAGING AS POTENTIAL DIGITAL BIOMARKERS OF METASTASIS RISK IN NON-SMALL CELL LUNG CANCER

Ainur E. Sadykova[1]*, Zhandos M. Amankulov[2]
[1] MSE on REM "City Central Polyclinic", Almaty, Kazakhstan
[2] Kazakh Institute of Oncology and Radiology, Almaty, Kazakhstan
** Corresponding author*

Introduction. Non-small cell lung cancer (NSCLC) has a high risk of nodal and distant dissemination. Conventional CT and 18F-FDG PET/CT have limitations in detecting micrometastatic disease and characterizing tumor heterogeneity, supporting interest in quantitative imaging biomarkers.

Objective. To synthesize evidence on CT- and 18F-FDG PET/CT-based radiomic features as potential digital biomarkers of lymph-node involvement, distant metastasis, and recurrence in NSCLC.
Materials and Methods. A structured narrative review of publications from 2020 to 2026 was performed. PubMed was searched using combinations of radiomics, metastasis, NSCLC, CT, PET/CT, machine learning, and deep learning. Original human studies evaluating radiomic or radiomic-clinical models for metastatic, recurrence, or related outcomes were considered; methodological reviews were used for context. Of 117 identified publications, 40 were included in the qualitative synthesis.
Results. The evidence addressed nodal metastasis, brain and bone metastases, recurrence after surgery or radiotherapy, and multimodal models integrating CT, PET/CT, and clinical variables. Combined intratumoral-peritumoral or imaging-clinical models frequently showed better discrimination than single-region or clinical-only models. Most studies were retrospective, single-center, and internally validated.
Discussion. The findings support the biological informativeness of radiomic heterogeneity, but clinical transportability is limited by variability in acquisition, segmentation, feature selection, and machine-learning pipelines, together with overfitting risk and insufficient external validation.
Conclusion. Radiomics may complement conventional NSCLC staging and risk stratification but should not replace histopathology, invasive nodal staging, or multidisciplinary decision-making. Prospective multicenter validation, harmonized pipelines, and clinical-impact studies are required.
Keywords: non-small cell lung cancer; metastasis; radiomics; computed tomography; 18F-FDG PET/CT; machine learning; digital biomarkers.

ҰСАҚ ЖАСУШАЛЫ ЕМЕС ӨКПЕ ҚАТЕРЛІ ІСІГІНДЕ МЕТАСТАЗДАНУ ҚАУПІНІҢ ӘЛЕУЕТТІ ЦИФРЛЫҚ БИОМАРКЕРЛЕРІ РЕТІНДЕ МОЛЕКУЛАЛЫҚ ВИЗУАЛИЗАЦИЯНЫҢ РАДИОМИКАЛЫҚ СИПАТТАМАЛАРЫ

Садықова Айнұр Ермекқызы[1]*, Аманқұлов Жандос Мұхтарұлы[2]
[1] «Қалалық орталық емхана» ШЖҚ КМК, Алматы, Қазақстан
[2] Қазақ онкология және радиология ғылыми-зерттеу институты, Алматы, Қазақстан
** Хат-хабар алмасуға жауапты автор*

Кіріспе. Ұсақ жасушалы емес өкпе қатерлі ісігі (ҰЖЕӨҚІ) лимфа түйіндеріне және алыс ағзаларға метастазданудың жоғары қаупімен сипатталады. Стандартты КТ және 18F-ФДГ-ПЭТ/КТ микрометастаздарды анықтау мен ісік гетерогендігін бағалауда шектеулі, сондықтан кескіндердің сандық биомаркерлеріне қызығушылық артуда.
Мақсаты. КТ және 18F-ФДГ-ПЭТ/КТ радиомикалық белгілерінің лимфа түйіндерінің зақымдануын, алыс метастаздарды және ҰЖЕӨҚІ кезіндегі рецидивті болжаудағы әлеуетін сипаттайтын деректерді жүйелеу.
Материалдар мен әдістер. 2020-2026 жылдардағы жарияланымдарға құрылымдалған нарративтік шолу жүргізілді. PubMed дерекқорында radiomics, metastasis, NSCLC, CT, PET/CT, machine learning және deep learning терминдері қолданылды. Метастаздану, рецидив және байланысты нәтижелерді болжауға арналған радиомикалық немесе радиомика-клиникалық модельдерді бағалаған адамдардағы түпнұсқа зерттеулер қарастырылды; әдіснамалық шолулар контекстік бағалау үшін пайдаланылды. Анықталған 117 жарияланымның 40-ы сапалық синтезге енгізілді.
Нәтижелер. Зерттеулер лимфа түйіндерінің зақымдануын, ми мен сүйек метастаздарын, хирургиялық немесе сәулелік емнен кейінгі рецидивті және КТ, ПЭТ/КТ мен клиникалық белгілерді біріктіретін мультимодальды модельдерді қамтыды. Біріктірілген модельдер жиі бір аймаққа немесе тек клиникалық деректерге негізделген модельдерден жоғары дискриминация көрсетті. Дәлелдердің басым бөлігі ретроспективті, бір орталықты және ішкі валидациямен шектелген.
Талқылау. Радиомикалық гетерогендік биологиялық тұрғыдан ақпаратты болғанымен, нәтижелердің клиникалық тасымалдануы кескін алу, сегментация, белгілерді іріктеу және машиналық оқыту алгоритмдерінің әркелкілігімен, қайта оқыту қаупімен және сыртқы валидацияның жеткіліксіздігімен шектеледі.
Қорытынды. Радиомика ҰЖЕӨҚІ-ні стандартты сатылауды және тәуекелді стратификациялауды толықтыра алады, бірақ морфологиялық верификацияны, инвазивті сатылауды және мультидисциплинарлық шешімді алмастырмауы тиіс. Проспективті көпорталықты валидация, біріздендірілген хаттамалар және клиникалық тиімділікті бағалау қажет.
Түйінді сөздер: ұсақ жасушалы емес өкпе қатерлі ісігі; метастаздану; радиомика; компьютерлік томография; 18F-ФДГ-ПЭТ/КТ; машиналық оқыту; цифрлық биомаркерлер.

Введение

Немелкоклеточный рак легкого (НМРЛ) является наиболее распространенной формой рака легких. Из-за неспецифичности клинических проявлений и отсутствия надежных биомаркеров раннего выявления он остается одной из основных причин онкологической смертности [1]. После подтверждения диагноза выбор лечебной тактики во многом определяется стадией, молекулярными характеристиками и вероятностью последующего метастазирования [1]. На долю НМРЛ приходится около 85% случаев рака легкого; среди его подтипов преобладают аденокарцинома и плоскоклеточный рак. У значительной доли пациентов отдаленные метастазы выявляются уже при постановке диагноза, что осложняет лечение и требует индивидуализированного подхода - от хирургии на ранних стадиях до химиолучевой терапии, таргетной терапии и иммунотерапии при распространенном процессе [2,3].

Одним из ключевых путей распространения НМРЛ является лимфогенное метастазирование. Точная оценка клинического (cN) и патологического (pN) статуса лимфатических узлов имеет принципиальное значение для выбора объема хирургического вмешательства, системной терапии и лучевого лечения [4]. Одним из основных методов клинического стадирования является 18F-ФДГ-ПЭТ/КТ [5].

Метастатические лимфатические узлы могут характеризоваться повышенным накоплением ФДГ и увеличением размеров, однако воспалительные и гранулематозные процессы вызывают ложноположительные результаты, а малые размеры очагов и пространственное разрешение ПЭТ могут приводить к пропуску микрометастазов. Размерный критерий короткой оси на КТ также недостаточно специфичен из-за перекрытия характеристик доброкачественных и метастатических узлов [6]. Визуальная и полуколичественная оценка не использует весь объем информации, содержащейся в изображениях. Радиомика позволяет извлекать количественные признаки формы, интенсивности и текстуры опухоли и окружающих тканей [8]. Надежность моделей при этом зависит от сегментации, предобработки, отбора признаков, способа валидации и алгоритма моделирования [22,28]. Ни один радиомический биомаркер метастазирования при НМРЛ пока не внедрен повсеместно в клиническую практику.

Цель обзора - систематизировать и критически оценить исследования радиомических характеристик КТ и молекулярной визуализации как потенциальных цифровых биомаркеров риска поражения лимфатических узлов, отдаленного метастазирования и рецидива при НМРЛ.

Научная новизна и вклад обзора

Научная новизна настоящего обзора заключается в совместном рассмотрении пяти взаимосвязанных направлений: радиомических моделей поражения лимфатических узлов; прогнозирования метастазов в головной мозг и кости; мультимодальной интеграции КТ, ПЭТ/КТ и клинических данных; прогнозирования рецидива после хирургического, лучевого и химиолучевого лечения; а также методологических и безопасностных условий клинического внедрения. Работа не предлагает новый диагностический тест и не подтверждает готовность отдельных алгоритмов к рутинному применению, а формирует критическую карту доказательств и ограничений.

Материалы и методы

Дизайн обзора

Работа выполнена как структурированный нарративный обзор. Такой дизайн выбран в связи с выраженной неоднородностью исследований по клиническим задачам, модальностям визуализации, областям интереса, способам сегментации, алгоритмам машинного обучения и показателям эффективности. Подготовка рукописи ориентирована на критерии качества нарративных обзоров SANRA;

систематический обзор и мета-анализ не проводились.

Источники информации и стратегия поиска

Поиск публикаций проводили в PubMed среди работ, опубликованных в 2020-2026 гг. Использовали комбинации терминов “radiomics”, “metastasis”, “NSCLC”, “non-small cell lung cancer”, “CT”, “PET/CT”, “18F-FDG”, “lymph node metastasis”, “brain metastasis”, “bone metastasis”, “recurrence”, “machine learning” и “deep learning”. Поисковая формула адаптировалась к конкретному направлению анализа. Из 117 выявленных публикаций 40 были включены в качественный синтез.

Критерии включения и исключения

Включали оригинальные рецензируемые исследования у взрослых пациентов с гистологически подтвержденным НМРЛ, в которых радиомические, deep-learning или комбинированные радиомико-клинические модели строились на данных КТ и/или 18F-ФДГ-ПЭТ/КТ и оценивали поражение лимфатических узлов, отдаленные метастазы, рецидив, безметастатическую или общую выживаемость. Методологические и обзорные публикации включали как контекстные источники для оценки стандартизации и клинической применимости. Исключали работы, не относящиеся к НМРЛ или метастазированию, единичные клинические наблюдения, редакционные материалы, публикации без описания методов моделирования или количественных показателей эффективности, а также работы без доступной информации, достаточной для интерпретации.

Отбор публикаций и извлечение данных

Заголовки и аннотации оценивали на соответствие цели обзора, после чего анализировали полные тексты потенциально релевантных публикаций. Основной поиск, отбор и первичную критическую оценку выполняла А.Е. Садыкова; методологическую и экспертную проверку осуществлял Ж.М. Аманкулов. Из каждой публикации извлекали дизайн, размер и характеристики выборки, модальность визуализации, область сегментации, тип признаков, алгоритм моделирования, предсказываемый исход, способ внутренней или внешней валидации, показатели дискриминации и основные ограничения.

Исходы обзора

Первичным исходом обзора была способность радиомических моделей прогнозировать лимфогенное или отдаленное метастазирование при НМРЛ. Вторичные исходы включали прогноз рецидива и выживаемости, сравнительную ценность интра- и перитуморальных признаков, добавочную ценность клинических данных и мультимодальной визуализации, наличие внешней валидации, воспроизводимость, стандартизацию и потенциальную клиническую применимость.

Критическая оценка и синтез

Из-за неоднородности дизайнов и исходов формальный мета-анализ не выполнялся. Результаты группировали по клинической задаче и синтезировали качественно. Больший интерпретационный вес придавали многоцентровым исследованиям, независимой внешней валидации, прозрачному описанию сегментации и предобработки, контролю переобучения и сравнению с клиническими моделями. Ретроспективные одноцентровые работы с малой выборкой и только внутренней кросс-валидацией оценивали более осторожно. Единый формальный инструмент риска систематической ошибки для всех включенных типов публикаций не применялся.

Этика и безопасность

Обзор основан исключительно на ранее опубликованных агрегированных данных, не включает набор участников, вмешательства или обработку индивидуальных медицинских изображений авторами; одобрение этического комитета и информированное согласие для настоящей работы не

требовались. С позиции клинической безопасности радиомические модели рассматриваются только как потенциальные инструменты поддержки решения. Ошибочная классификация может привести к недооценке стадии, неоправданному расширению лечения или пропуску инвазивного подтверждения; поэтому алгоритмы не должны заменять гистопатологию, стандартизированное стадирование и заключение мультидисциплинарной команды.

Результаты

Характеристика включенных публикаций

Из 117 найденных публикаций 40 соответствовали тематике и критериям качественного синтеза; остальные были исключены при оценке заголовков, аннотаций или полных текстов. Доказательная база включала преимущественно ретроспективные исследования КТ- и ПЭТ/КТ-радиомики, отдельные многоцентровые работы, исследования глубокого обучения и методологические обзоры. Основные направления анализа представлены ниже.

1. Радиомика: принципы и возможности

Радиомика превращает медицинские изображения в количественные данные, характеризующие форму, интенсивность и текстуру опухоли. В легочной онкологии радиомика 18F-ФДГ-ПЭТ/КТ представляет интерес как способ оценки метаболической гетерогенности [3]. Текстурные признаки первичной опухоли и лимфатических узлов могут обладать дополнительной прогностической ценностью при НМРЛ [19]. Радиомические модели исследовались для дифференциации узлов, уточнения стадии, определения гистологического типа, молекулярных характеристик, прогноза и ответа на терапию, однако уровень доказательств различается между задачами [7].

Число работ по применению искусственного интеллекта в визуализации быстро растет. Алгоритмы могут поддерживать обнаружение очагов, шумоподавление и анализ низкодозовых исследований; модели глубокого обучения в отдельных выборках демонстрировали сопоставимые или более высокие показатели, чем традиционные подходы. Эти результаты не следует интерпретировать как доказанное превосходство над специалистами в реальной клинической практике. Преимущества в T- и M-стадировании и оценке лимфатических узлов остаются неоднородными, а концепция «виртуальной биопсии» требует проспективной клинической проверки [7,22].

2. Радиомические модели прогнозирования поражения лимфатических узлов

В 11 анализируемых публикациях радиомические модели КТ и ПЭТ/КТ оценивали вероятность метастатического поражения лимфатических узлов. ПЭТ-признаки в сочетании с КТ-характеристиками позволяли лучше различать истинно- и ложноположительные медиастинально-корневые узлы, чем отдельные стандартные параметры [9]. Модель K. Zheng и соавт. на основе 18F-ФДГ-ПЭТ/КТ предоставляла дополнительную информацию для стадирования медиастинальных лимфатических узлов [5]. Такие оценки могут поддерживать выбор диагностической стратегии, но не являются самостоятельным основанием для уменьшения объема операции или отказа от инвазивного стадирования.

Модель R. Xu и соавт., включавшая интратуморальные и перитуморальные признаки КТ, превосходила модели, основанные только на интратуморальных или клинических данных [34]. ПЭТ/КТ-номограмма J. Qiao и соавт. оценивала скрытые метастазы при клинической стадии N0 [26]. Номограмма Q.L. Chen и соавт., объединявшая GPTV6 и клинические предикторы, была разработана для прогноза поражения узлов и исходов при стадии IA [10]. Модели X. Zheng и Y. Huang также демонстрировали приемлемую дискриминацию и калибровку [14,24]. Эти данные подтверждают добавочную

информативность радиомики, но не устраняют необходимость внешней валидации.

DLR-модель F. Duan и соавт. сочетала признаки DenseNet121 и классической радиомики для дифференциации доброкачественных и метастатических узлов [40]. Random Forest-модель Y. Kang и соавт. интегрировала радиомические и клинические характеристики для оценки метастазирования в лимфатические узлы 4-й станции [21]. Модель J. Liang и соавт. была направлена на выявление оккультного поражения узлов при cN0 НМРЛ [38]. Результаты могут быть полезны для планирования объема дальнейшего обследования и лечения, однако заявлять об улучшении прогноза пациентов без исследований клинического воздействия преждевременно.

Двухрегиональная модель H.J. Yan и соавт. использовала признаки первичной опухоли и субкаринальных лимфатических узлов и превосходила однорегиональные варианты в исходной выборке [33]. T. Lu и соавт. применили глубокое переносное обучение для анализа интра- и перитуморальных зон [4]. Диагностическая точность КТ- и ПЭТ/КТ-радиомики в целом выглядит перспективной, однако систематическая оценка указывает на необходимость крупных проспективных многоцентровых исследований и стандартизированной внешней валидации [37].

3. Прогнозирование отдаленных метастазов: головной мозг и кости

Частота метастазов в головной мозг существенно зависит от стадии, гистологического и молекулярного подтипа и длительности наблюдения; в литературе приводится широкий диапазон значений. Поэтому единичные показатели распространенности не должны переноситься на всех пациентов с НМРЛ. Радиомические модели первичной опухоли и клинико-патологические характеристики исследовались для оценки риска мозговых метастазов после хирургического лечения [13]. J. Gong и соавт. разработали ансамблевую модель с автоматической сегментацией на основе deep residual U-Net и КТ-радиомикой для трехлетнего риска мозговых метастазов, безметастатической выживаемости мозга и общей выживаемости [18]. Комбинирование радиомических и клинических признаков улучшало показатели модели, но требует независимой проверки.

Z. Liu и соавт. выявили признаки первичной опухоли на КТ, ассоциированные с наличием костных метастазов, и построили радиомическую подпись и номограмму [15]. Такой инструмент может использоваться для формирования гипотез и риск-ориентированного обследования, но его нельзя рассматривать как замену стандартным методам диагностики костного метастазирования.

4. Мультимодальные модели и перспективы

Девять публикаций оценивали сочетание КТ, ПЭТ/КТ, клинико-патологических и эпидемиологических признаков. Номограмма Z. Peng и соавт. объединяла радиомические и клинические показатели для прогнозирования исходов [23], а модель J. Lin и соавт. классифицировала гистологические типы и стадии НМРЛ по КТ-радиомике [31]. Эти задачи связаны с риском метастазирования, но не являются его прямыми эквивалентами.

Интра- и перитуморальные модели Q. Chen и соавт. оценивали лимфоваскулярную инвазию и общую выживаемость [25]. Модели, основанные на GTV и CTV, применялись для прогнозирования оккультного поражения лимфатических узлов при ранних стадиях НМРЛ [12]. Комбинированные области интереса часто давали лучшие показатели внутри исходных выборок, однако усложнение модели повышает риск переобучения и требования к стандартизации сегментации. Мультимодальный подход Y. Zhu и соавт. с 3D-нейронными сетями выявлял признаки, ассоциированные с риском мозговых метастазов [17]. Такие модели могут поддерживать риск-адаптированное МРТ-наблюдение, но сами по себе не обосновывают профилактическое облучение головного мозга или изменение

лечения вне клинических рекомендаций. Многоцентровая модель X. Yin и соавт. оценивала оккультное поражение лимфатических узлов при ранней аденокарциноме [39]. Исследование C. Bortolotto и соавт. показало, что лишь часть признаков стабильна между КТ и МРТ и различными программными платформами, что подчеркивает проблему кросс-модальной воспроизводимости [20].

Модель M.T. Warkentin и соавт. оценивала злокачественность неопределенных легочных узлов при низкодозовом КТ-скрининге [36]; эта задача методологически связана с радиомикой, но не является прямым прогнозом метастазирования. Модель EGFR-RS C.Y. Hsu и соавт. изучала фенотипы, связанные с EGFR и локальным рецидивом мозговых метастазов [32]. Радиомические и deep-learning признаки низкодозовой КТ в работе X. Song и соавт. использовались для оценки отдаленного метастазирования [35]. Рутинная интеграция таких алгоритмов возможна только после подтверждения переносимости и клинической пользы.

5. Прогнозирование после хирургического, лучевого и химиолучевого лечения

Многоцентровая ПЭТ/КТ-радиомическая модель L. Yu и соавт. оценивала риск отдаленных метастазов после стереотаксической лучевой терапии при ранних стадиях НМРЛ [16]. Радиомические признаки предлечебных аналоговых и цифровых 18F-ФДГ-ПЭТ/КТ в работе F. Lucia и соавт. были связаны с регионарным и/или отдаленным рецидивом после SBRT [30]. Доказательная база радиомики рецидива постепенно расширяется, но неоднородность протоколов и ограниченная внешняя валидация по-прежнему препятствуют рутинному применению [29].

DL-номограмма Y. Niu и соавт., включавшая радиомические признаки опухоли и характеристики медиастинальной жировой ткани, оценивала риск послеоперационных мозговых метастазов [27]. Отдельные модели КТ- и ПЭТ/КТ-радиомики исследовали характер рецидива после химиолучевой терапии; радиомические признаки и клинические данные могли улучшать прогнозирование в исходных выборках [11]. Эти результаты должны рассматриваться как основание для проспективных исследований, а не как готовые клинические правила.

Обсуждение

Основные результаты

Рассмотренные публикации показывают, что радиомические характеристики первичной опухоли, перитуморальной зоны и лимфатических узлов содержат информацию, связанную с метастатическим потенциалом НМРЛ. Наиболее последовательный сигнал получен для комбинированных моделей, объединяющих несколько областей интереса и клинические данные. Вместе с тем повышение показателей в обучающей или внутренней тестовой выборке не тождественно клинической применимости.

Интерпретация и клиническая безопасность

Радиомика может быть полезна как дополнительный слой риск-стратификации: для выделения пациентов, которым требуется более тщательное стадирование, планирование биопсии, эндобронхиальное или хирургическое подтверждение лимфатических узлов, расширенное наблюдение или обсуждение в мультидисциплинарной команде. Однако клинические последствия ложноположительной и ложноотрицательной классификации существенны. До проведения исследований клинического воздействия алгоритмы не должны определять отказ от инвазивной диагностики, объем лимфаденэктомии, назначение неоадъювантной терапии или профилактического облучения самостоятельно.

Методологические ограничения доказательств

Большинство исследований имели ретроспективный одноцентровый дизайн,

включали относительно небольшие выборки и использовали внутреннюю кросс-валидацию. Неодинаковые протоколы КТ и ПЭТ/КТ, реконструкция, размер вокселя, сегментация, нормализация, дискретизация и программное обеспечение ограничивают сопоставимость. Частый отбор большого числа признаков при малом количестве событий повышает риск переобучения. Публикация преимущественно положительных моделей может создавать публикационное смещение. Внешняя валидация, анализ калибровки и полезности решения, а также сравнение с полноценным клиническим стандартом выполнялись не во всех работах [20,22,28,37].

Ограничения настоящего обзора

Настоящий обзор имеет ограничения. Поиск проводился только в PubMed, поэтому могли быть пропущены публикации из Embase, Scopus, Web of Science и специализированных инженерных баз. Точная воспроизводимая строка поиска и поэтапный журнал исключений в исходных материалах не были представлены. Не выполнялись двойной независимый скрининг, регистрация протокола, формальная оценка риска систематической ошибки каждого исследования и мета-анализ. В обзор включены исследования разных клинических задач, а также отдельные методологические и обзорные публикации, что не позволяет интерпретировать 40 источников как 40 статистически независимых наборов данных. Выводы основаны на повторяющихся качественных закономерностях, а не на объединенной оценке эффекта.

Направления дальнейших исследований

Необходимы проспективные многоцентровые исследования с предварительно опубликованным протоколом, унифицированными критериями включения, стандартизированным получением и реконструкцией изображений, IBSI-совместимым извлечением признаков, независимой внешней валидацией и заранее определенными клиническими порогами. Следует сообщать калибровку, decision-curve analysis, пропущенные данные, стабильность сегментации и сравнение с клиническим стандартом. Финальным этапом должны стать исследования, оценивающие, улучшает ли использование модели реальные решения и исходы пациентов.

Заключение

Радиомика позволяет количественно оценивать морфологические и метаболические фенотипы, не полностью доступные визуальной интерпретации, и демонстрирует потенциал для прогнозирования поражения лимфатических узлов, метастазов в головной мозг и кости и рецидива при НМРЛ. Интеграция интра- и перитуморальных признаков с клиническими данными и мультимодальной визуализацией часто улучшала показатели моделей в исследовательских выборках.

Вместе с тем преобладание ретроспективных одноцентровых исследований, методологическая неоднородность, риск переобучения и недостаток независимой внешней валидации не позволяют считать радиомические модели готовыми цифровыми биомаркерами для рутинного клинического применения. Радиомика может рассматриваться как потенциальное дополнение, но не замена морфологической верификации, инвазивного стадирования и мультидисциплинарного решения. Клиническое внедрение требует стандартизированных протоколов, проспективной многоцентровой проверки и доказательства влияния на решения и исходы пациентов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1 Wilk AM, et al. Radiomic signature accurately predicts the risk of metastatic dissemination in late-stage non-small cell lung cancer. Transl Lung Cancer Res. 2023;12(7):1372-83. doi:10.21037/tlcr-23-60.
2 Tao J, et al. Development and validation of a CT-based signature for the prediction of distant metastasis before treatment of non-small cell lung cancer. Acad Radiol. 2022;29 Suppl 1:S62-S72. doi:10.1016/j.acra.2020.12.007.
3 Tang X, Wu F, Chen X, Ye S, Ding Z. Current status and prospect of PET-related imaging radiomics in lung cancer. Front Oncol. 2023;13:1297674. doi:10.3389/fonc.2023.1297674.
4 Lu T, Ma J, Zou J, Jiang C, Li Y, Han J. CT-based intratumoral and peritumoral deep transfer learning features prediction of lymph node metastasis in non-small cell lung cancer. J Xray Sci Technol. 2024;32(3):597-609. doi:10.3233/XST-230326.
5 Zheng K, et al. Pre-operative prediction of mediastinal node metastasis using radiomics model based on 18F-FDG PET/CT of the primary tumor in non-small cell lung cancer patients. Front Med (Lausanne). 2021;8:673876. doi:10.3389/fmed.2021.673876.
6 Xie Y, et al. A PET/CT nomogram incorporating SUVmax and CT radiomics for preoperative nodal staging in non-small cell lung cancer. Eur Radiol. 2021;31(8):6030-8. doi:10.1007/s00330-020-07624-9.
7 Manafi-Farid R, et al. 18F-FDG-PET/CT radiomics and artificial intelligence in lung cancer: technical aspects and potential clinical applications. Semin Nucl Med. 2022;52(6):759-80. doi:10.1053/j.semnuclmed.2022.04.004.
8 Ge G, Zhang J. Uniqueness of radiomic features in non-small cell lung cancer. J Appl Clin Med Phys. 2022;23(12):e13787. doi:10.1002/acm2.13787.
9 Ouyang ML, et al. Development and validation of an 18F-FDG PET-based radiomic model for evaluating hypermetabolic mediastinal-hilar lymph nodes in non-small-cell lung cancer. Front Oncol. 2021;11:710909. doi:10.3389/fonc.2021.710909.
10 Chen QL, et al. Radiomics nomogram integrating intratumoural and peritumoural features to predict lymph node metastasis and prognosis in clinical stage IA non-small cell lung cancer: a two-centre study. Clin Radiol. 2023;78(5):e359-e367. doi:10.1016/j.crad.2023.02.004.
11 Liu W, et al. Recurrence patterns are significantly associated with the 18F-FDG PET/CT radiomic features of patients with locally advanced non-small cell lung cancer treated with chemoradiotherapy. Oncol Lett. 2023;26(1):317. doi:10.3892/ol.2023.13903.
12 Zeng C, et al. Efficacy of radiomics model based on the concept of gross tumor volume and clinical target volume in predicting occult lymph node metastasis in non-small cell lung cancer. Front Oncol. 2023;13:1096364. doi:10.3389/fonc.2023.1096364.
13 Zheng Z, et al. 18F-FDG PET/CT radiomics predicts brain metastasis in I-IIIA resected non-small cell lung cancer. Eur J Radiol. 2023;165:110933. doi:10.1016/j.ejrad.2023.110933.
14 Huang Y, et al. Preoperative prediction of mediastinal lymph node metastasis in non-small cell lung cancer based on 18F-FDG PET/CT radiomics. Clin Radiol. 2023;78(1):8-17. doi:10.1016/j.crad.2022.08.140.
15 Liu Z, et al. Bone metastasis prediction in non-small-cell lung cancer: primary CT-based radiomics signature and clinical feature. BMC Med Imaging. 2024;24(1):203. doi:10.1186/s12880-024-01383-5.
16 Yu L, et al. A PET/CT radiomics model for predicting distant metastasis in early-stage non-small cell lung cancer patients treated with stereotactic body radiotherapy: a multicentric study. Radiat Oncol. 2024;19(1):10. doi:10.1186/s13014-024-02402-z.
17 Zhu Y, et al. Multimodal radiomics-based methods using deep learning for prediction of brain metastasis in non-small cell lung cancer with 18F-FDG PET/CT images. Biomed Phys Eng Express. 2024;10(6):065011. doi:10.1088/2057-1976/ad7595.

18 Gong J, et al. Enhancing brain metastasis prediction in non-small cell lung cancer: a deep learning-based segmentation and CT radiomics-based ensemble learning model. Cancer Imaging. 2024;24(1):1. doi:10.1186/s40644-023-00623-1.
19 Aguloglu N, Aksu A, Unat DS, Unat OS. The value of PET/CT radiomic texture analysis of primary mass and mediastinal lymph node on survival in patients with non-small cell lung cancer. Rev Esp Med Nucl Imagen Mol (Engl Ed). 2024;43(5):500027. doi:10.1016/j.remnie.2024.500027.
20 Bortolotto C, Pinto A, Brero F, et al. CT and MRI radiomic features of lung cancer (NSCLC): comparison and software consistency. Eur Radiol Exp. 2024;8(1):71. doi:10.1186/s41747-024-00468-8.
21 Kang Y, et al. Computed tomography-based radiomics model for predicting station 4 lymph node metastasis in non-small cell lung cancer. BMC Med Imaging. 2025;25(1):202. doi:10.1186/s12880-025-01686-1.
22 Horne A, et al. Mastering CT-based radiomic research in lung cancer: a practical guide from study design to critical appraisal. Br J Radiol. 2025;98(1169):653-68. doi:10.1093/bjr/tqaf051.
23 Peng Z, et al. Application of prediction model based on CT radiomics in prognosis of patients with non-small cell lung cancer. BMC Cancer. 2025;25(1):1273. doi:10.1186/s12885-025-14544-8.
24 Zheng X, et al. A comprehensive nomogram combining CT imaging with clinical features for prediction of lymph node metastasis in stage I-IIIB non-small cell lung cancer. Ther Innov Regul Sci. 2022;56(1):155-67. doi:10.1007/s43441-021-00345-1.
25 Chen Q, et al. Intratumoral and peritumoral radiomics nomograms for the preoperative prediction of lymphovascular invasion and overall survival in non-small cell lung cancer. Eur Radiol. 2023;33(2):947-58. doi:10.1007/s00330-022-09109-3.
26 Qiao J, Zhang X, Du M, Wang P, Xin J. 18F-FDG PET/CT radiomics nomogram for predicting occult lymph node metastasis of non-small cell lung cancer. Front Oncol. 2022;12:974934. doi:10.3389/fonc.2022.974934.
27 Niu Y, Jia HB, Li XM, et al. Deep learning radiomics and mediastinal adipose tissue-based nomogram for preoperative prediction of postoperative brain metastasis risk in non-small cell lung cancer. BMC Cancer. 2025;25(1):1133. doi:10.1186/s12885-025-14466-5.
28 Ge G, Zhang J. Feature selection methods and predictive models in CT lung cancer radiomics. J Appl Clin Med Phys. 2023;24(1):e13869. doi:10.1002/acm2.13869.
29 Libling WA, Korn R, Weiss GJ. Review of the use of radiomics to assess the risk of recurrence in early-stage non-small cell lung cancer. Transl Lung Cancer Res. 2023;12(7):1575-89. doi:10.21037/tlcr-23-5.
30 Lucia F, et al. Multicentric development and evaluation of 18F-FDG PET/CT and CT radiomic models to predict regional and/or distant recurrence in early-stage non-small cell lung cancer treated by stereotactic body radiation therapy. Eur J Nucl Med Mol Imaging. 2024;51(4):1097-108. doi:10.1007/s00259-023-06510-y.
31 Lin J, Yu Y, Zhang X, Wang Z, Li S. Classification of histological types and stages in non-small cell lung cancer using radiomic features based on CT images. J Digit Imaging. 2023;36(3):1029-37. doi:10.1007/s10278-023-00792-2.
32 Hsu CY, Tsai HH, Chen TL, et al. Multimodal radiomic analysis to determine high-consistency prognostic phenotypes associated with epidermal growth factor receptor mutations in non-small cell lung cancer brain metastases. Eur J Radiol. 2025;193:112420. doi:10.1016/j.ejrad.2025.112420.
33 Yan HJ, et al. Dual-region computed tomography radiomics-based machine learning predicts subcarinal lymph node metastasis in patients with non-small cell lung cancer. Ann Surg Oncol. 2024;31(8):5011-20. doi:10.1245/s10434-024-15197-w.

34 Xu R, et al. Evaluating peritumoral and intratumoral radiomics signatures for predicting lymph node metastasis in surgically resectable non-small cell lung cancer. Front Oncol. 2024;14:1427743. doi:10.3389/fonc.2024.1427743.
35 Song X, et al. Computer-aided diagnosis of distal metastasis in non-small cell lung cancer by low-dose CT-based radiomics and deep learning signatures. Radiol Med. 2024;129(2):239-51. doi:10.1007/s11547-024-01770-6.
36 Warkentin MT, et al. Radiomics analysis to predict pulmonary nodule malignancy using machine learning approaches. Thorax. 2024;79(4):307-15. doi:10.1136/thorax-2023-220226.
37 Li Y, Deng J, Ma X, Li W, Wang Z. Diagnostic accuracy of CT and PET/CT radiomics in predicting lymph node metastasis in non-small cell lung cancer. Eur Radiol. 2025;35(4):1966-79. doi:10.1007/s00330-024-11036-4.
38 Liang J, Zhu H, Long Y, Lu L, Yang X, Ding H. Prediction of occult lymph node metastasis in cN0 stage non-small cell lung cancer using contrast-enhanced CT. J Coll Physicians Surg Pak. 2025;35(5):611-5. doi:10.29271/jcpsp.2025.05.611.
39 Yin X, et al. CT-based radiomics-deep learning model predicts occult lymph node metastasis in early-stage lung adenocarcinoma patients: a multicenter study. Chin J Cancer Res. 2025;37(1):12-24. doi:10.21147/j.issn.1000-9604.2025.01.02.
40 Duan F, et al. Deep learning radiomics and 18F-FDG PET/CT imaging: mediastinal lymph node characteristics as predictors of metastasis in non-small cell lung cancer. Transl Lung Cancer Res. 2025;14(10):4301-14. doi:10.21037/tlcr-2025-650.

Декларации

Этическое одобрение и согласие на участие

Не применимо. Работа представляет собой обзор ранее опубликованных данных и не включала новых участников, вмешательства или обработку индивидуальных медицинских данных авторами.

Безопасность

В рукописи радиомические модели рассматриваются как исследовательские инструменты поддержки принятия решений. Они не предназначены для замены морфологической верификации, инвазивного стадирования и клинического решения мультидисциплинарной команды.

Доступность данных

Все данные, использованные в обзоре, содержатся в цитируемых публикациях. Рабочая таблица извлечения данных может быть предоставлена автором для корреспонденции по обоснованному запросу.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия.

Финансирование

Исследование не получало внешнего финансирования.

Вклад авторов:

Садыкова Айнур Ермеккызы: Methodology; Investigation; Data curation; Formal analysis; Writing - original draft. Аманкулов Жандос Мухтарович: Conceptualization; Methodology; Validation; Supervision; Writing - review and editing. Оба автора прочитали и одобрили окончательную версию рукописи и согласились нести ответственность за целостность работы.

Declarations

Ethics approval and consent to participate: Not applicable because this review used only previously published aggregate data and involved no new participants or individual-level medical data.

Safety statement: Radiomic models are discussed as investigational decision-support tools and must not replace histopathological verification, invasive staging, or multidisciplinary clinical judgment.
Data availability: All data synthesized in this review are contained in the cited publications. The working extraction matrix may be available from the corresponding author upon reasonable request.
Conflict of interest: The authors declare no conflicts of interest requiring disclosure.
Funding: No external funding was received.

Author contributions: Ainur E. Sadykova - Methodology; Investigation; Data curation; Formal analysis; Writing - original draft. Zhandos M. Amankulov - Conceptualization; Methodology; Validation; Supervision; Writing - review and editing. Both authors read and approved the final manuscript and accept responsibility for the integrity of the work.

Мәлімдемелер
Этикалық мақұлдау және қатысуға келісім: қолданылмайды, себебі шолу тек бұрын жарияланған жинақталған деректерге негізделді және жаңа қатысушыларды немесе жеке медициналық деректерді қамтымады.
Қауіпсіздік: радиомикалық модельдер зерттеулік шешім қабылдауды қолдау құралдары ретінде қарастырылады және морфологиялық растауды, инвазивті сатылауды немесе мультидисциплинарлық клиникалық шешімді алмастырмауы тиіс.
Деректердің қолжетімділігі: шолуда пайдаланылған барлық деректер сілтеме жасалған жарияланымдарда берілген. Деректерді шығару кестесі негізделген сұрау бойынша хат-хабар авторынан алынуы мүмкін.
Мүдделер қақтығысы: авторлар ашып көрсетуді талап ететін мүдделер қақтығысының жоқ екенін мәлімдейді.
Қаржыландыру: зерттеу сыртқы қаржыландыру алған жоқ.

Авторлардың үлесі: Садықова Айнұр Ермекқызы - әдіснама; зерттеу жүргізу; деректерді басқару; формалды талдау; қолжазбаның бастапқы нұсқасын дайындау. Аманқұлов Жандос Мұхтарұлы - тұжырымдамалау; әдіснама; валидация; ғылыми жетекшілік; қолжазбаны қайта қарау және редакциялау. Екі автор да қолжазбаның соңғы нұсқасын оқып, мақұлдады және жұмыстың тұтастығына жауап береді.

Сведения об авторах:
Садыкова Айнур Ермеккызы - врач-радиолог, ГКП на ПХВ «Городская центральная поликлиника», Алматы, Казахстан; e-mail: ainursadykova2023@gmail.ru; тел.: +7 707 858 8321; ORCID: 0009-0003-6347-1512. Автор, ответственный за корреспонденцию.
Аманкулов Жандос Мухтарович - PhD, заведующий отделением радиологии и ядерной медицины Казахского научно-исследовательского института онкологии и радиологии, Алматы, Казахстан; e-mail: zh.amankulov@mail.ru; тел.: +7 702 568 9547; ORCID: 0000-0001-7389-3119.

Information about the authors:
Ainur E. Sadykova MSE on REM “City Central Polyclinic”, Almaty, Kazakhstan; e-mail: ainursadykova2023@gmail.ru; tel.: +7 707 858 8321; ORCID: 0009-0003-6347-1512. Corresponding author.
Zhandos M. Amankulov - PhD, Head of the Department of Radiology and Nuclear Medicine, Kazakh Institute of Oncology and Radiology, Almaty, Kazakhstan; e-mail: zh.amankulov@mail.ru; tel.: +7 702 568 9547; ORCID: 0000-0001-7389-3119.

Авторлар туралы мәлімет:
Садықова Айнұр Ермекқызы - дәрігер-радиолог, «Қалалық орталық емхана» ШЖҚ КМК, Алматы, Қазақстан; e-mail: ainursadykova2023@gmail.ru; тел.: +7 707 858 8321; ORCID: 0009-0003-6347-1512. Хат-хабар алмасуға жауапты автор.
Аманқұлов Жандос Мұхтарұлы - PhD, Қазақ онкология және радиология ғылыми-зерттеу институтының радиология және ядролық медицина бөлімінің меңгерушісі, Алматы, Қазақстан; e-mail: zh.amankulov@mail.ru; тел.: +7 702 568 9547; ORCID: 0000-0001-7389-3119.