УДК 616-006:616-073.756

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ЛУЧЕВОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ В РАННЕЙ ДИАГНОСТИКЕ И ОЦЕНКЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕРАПИИ ЗЛОКАЧЕСТВЕННЫХ НОВООБРАЗОВАНИЙ

Аманов Д.К.

ассистент кафедры лучевой диагностики, лучевой терапии и онкологии, Государственный медицинский университет Туркменистана имени Мырата Гаррыева,

Ашхабад, Туркменистан

Аннотация. В статье рассматривается эволюция и современное состояние методов лучевой диагностики в онкологической практике, с акцентом на их роль в выявлении злокачественных новообразований на доклинических и ранних стадиях, а также в прецизионной оценке ответа опухоли на противоопухолевое лечение. Анализируются возможности мультипараметрической магнитно-резонансной томографии, компьютерной томографии с высоким разрешением, позитронно-эмиссионной томографии, совмещенной с компьютерной или магнитно-резонансной томографией (ПЭТ-КТ/ПЭТ-МРТ), а также гибридных радионуклидных технологий. Особое внимание уделено критериям оценки терапевтического ответа (RECIST, PERCIST) и внедрению методов радиомики и искусственного интеллекта для количественного анализа медицинских изображений. Представленные данные демонстрируют, что интеграция анатомических, функциональных и молекулярных модальностей позволяет существенно повысить специфичность и чувствительность ранней диагностики, минимизировать ложноположительные результаты и оптимизировать персонализированную терапию пациентов.

Ключевые слова: лучевая диагностика, ранняя диагностика, злокачественные новообразования, магнитно-резонансная томография, позитронно-эмиссионная томография, оценка эффективности терапии, радиомика, таргетная терапия.

MODERN METHODS OF DIAGNOSTIC IMAGING IN EARLY DIAGNOSIS AND EVALUATION OF TREATMENT EFFICACY IN MALIGNANT NEOPLASMS

Amanov D.K.

Assistant, Department of Radiological Diagnostics, Radiotherapy and Oncology, Myrat Garryyev State Medical University of Turkmenistan,

Ashgabat, Turkmenistan

Abstract. This article examines the evolution and current state of diagnostic imaging in oncological practice, emphasizing its role in detecting malignant neoplasms at preclinical and early stages, as well as in the precision evaluation of tumor response to anti-cancer therapy. The capabilities of multiparametric magnetic resonance imaging, high-resolution computed tomography, positron emission tomography combined with computed or magnetic resonance tomography (PET-CT/PET-MRI), and hybrid radionuclide technologies are analyzed. Special attention is paid to therapeutic response criteria (RECIST, PERCIST) and the integration of radiomics and artificial intelligence for the quantitative analysis of medical images. The presented data demonstrate that the integration of anatomical, functional, and molecular modalities significantly improves the specificity and sensitivity of early diagnosis, minimizes false-positive results, and optimizes personalized patient therapy.

Keywords: diagnostic imaging, early diagnosis, malignant neoplasms, magnetic resonance imaging, positron emission tomography, evaluation of treatment efficacy, radiomics, targeted therapy.

Введение

Проблема своевременной верификации злокачественных новообразований и адекватного мониторинга ответа на проводимое противоопухолевое лечение остается одной из наиболее сложных задач современной онкологии и лучевой диагностики. Несмотря на активное внедрение инновационных

фармакологических агентов, включая таргетную и иммунотерапию, показатели летальности при запущенных стадиях онкологических заболеваний продолжают оставаться высокими [1]. Фундаментальным фактором, определяющим благоприятный прогноз выживаемости пациентов, выступает обнаружение опухолевого процесса на ранних стадиях, когда объем поражения минимален, а метастатический потенциал еще не реализован. Традиционные методы визуализации, долгие годы базировавшиеся преимущественно на двухмерной рентгенографии и базовой сонографии, исчерпали свой потенциал в решении задач высокоточной топической и фенотипической диагностики.

На смену морфоцентрическому подходу приходит парадигма мультимодальной визуализации, объединяющая высокоразрешающую анатомическую визуализацию с картированием тканевого метаболизма, перфузии, клеточной плотности и молекулярного профиля. Развитие гибридных технологий, таких как ПЭТ-КТ и ПЭТ-МРТ, а также стандартизация критериев оценки терапевтического ответа (RECIST 1.1, PERCIST, mRECIST) создали принципиально новые условия для клинических исследований [6]. Тем не менее, стремительный рост объема получаемых цифровых данных порождает ряд методических проблем, связанных с субъективностью визуального анализа, необходимостью дифференциации истинного прогрессирования от псевдопрогрессирования и лучевых повреждений. Целью настоящего исследования является систематизация и глубокий анализ современных возможностей лучевых методов в ранней диагностике злокачественных опухолей и объективной оценке эффективности противоопухолевой терапии с учетом интеграции радиомических подходов.

Результаты исследования

1. Роль функциональной магнитно-резонансной томографии в ранней диагностике и картировании опухолевого микроокружения

Магнитно-резонансная томография (МРТ) за последние годы трансформировалась из чисто анатомического метода в мощный инструмент функционального анализа. Внедрение методик диффузионно-взвешенной визуализации (ДВВ / DWI), перфузионной МРТ (PWI) и спектроскопии позволяет неинвазивно исследовать микроструктурные особенности тканей задолго до появления макроскопических изменений контуров органа [4].

Диффузионно-взвешенная томография базируется на оценке броуновского движения молекул внеклеточной воды. Злокачественные новообразования характеризуются гиперцеллюлярностью, уменьшением внеклеточного пространства и снижением значений измеряемого коэффициента диффузии (ИКД / ADC). Это делает ДВВ высокочувствительным инструментом ранней детекции патологических очагов в паренхиматозных органах (печень, почки, предстательная железа, головной мозг), а также в лимфатических узлах. В свою очередь, динамическая контрастная перфузионная МРТ (DCE-MRI) дает возможность количественно оценить кинетику накопления и вымывания парамагнитного контрастного препарата, отражающую степень патологического неоангиогенеза. Параметры проницаемости сосудистого русла (,) служат надежными маркерами степени злокачественности опухоли и позволяют прогнозировать ее ответ на неоадъювантную терапию [2, с. 112].

2. Молекулярная визуализация (ПЭТ-КТ и ПЭТ-МРТ) в детекции минимального резидуального заболевания и оценке ответа на лечение

Позитронно-эмиссионная томография в сочетании с компьютерной томографией (ПЭТ-КТ) изменила стандарты стадирования и мониторинга большинства солидных опухолей и гемобластозов. Использование классического радиофармпрепарата (РФП) ^{1}фтордезоксиглюкозы (^{1}

ФДГ) основано на феномене усиленного гликолиза в опухолевых клетках (эффект Варбурга). Однако диагностическая ценность ^{1}ФДГ ограничена при новообразованиях с низкой метаболической активностью или высокой физиологической экспрессией (например, высокодифференцированные нейроэндокринные опухоли, рак предстательной железы) [9].

По этой причине современная ядерная медицина активно внедряет таргетные радиофармпрепараты. При раке предстательной железы золотым стандартом стали лиганды простатического специфического мембранного антигена (ПСМА), меченные 68 Ga или 18F (68Ga-PSMA-11), демонстрирующие беспрецедентную чувствительность в выявлении микрометастазов в лимфоузлах на ранних этапах рецидива. Для нейроэндокринных опухолей применяются аналоги соматостатина, меченные галлием или лютецием.

При оценке эффективности лекарственного лечения ПЭТ-КТ позволяет фиксировать метаболический ответ опухоли значительно раньше, чем произойдет ее анатомическое уменьшение в размерах. Снижение стандартизированного уровня захвата РФП (SUVmax или SULpeak) служит ранним прогностическим признаком успешности химио- или лучевой терапии. Сопоставление характеристик методов представлено в таблице 1.

Таблица 1 – Сравнительная характеристика современных методов лучевой визуализации в онкологии

Метод лучевой визуализации	Основной физиологический или анатомический параметр	Преимущества в ранней диагностике	Ограничения и потенциальные ловушки
Мультипараметрическая МРТ	Плотность клеток, перфузия,	Высокое мягкотканное разрешение,	Артефакты от движения, высокая

	спектроскопический профиль, объем внеклеточного пространства	отсутствие ионизирующего излучения, оценка клеточности (DWI)	стоимость, длительное время сканирования
ПЭТ-КТ с $18F$-ФДГ	Интенсивность метаболизма глюкозы, уровень экспрессии GLUT-транспортеров	Оценка всего тела за одно исследование, ранняя детекция метастазов до изменения размеров	Высокая лучевая нагрузка, ложноположительные результаты при воспалительных процессах
Мультиспиральная КТ с болюсным контрастированием	Пространственное разрешение, плотность ткани в различные фазы контрастирования	Быстрота сканирования, отличная визуализация костных структур и сосудов	Наличие ионизирующего излучения, риск нефропатии, аллергические реакции на йод
ПЭТ-МРТ гибридные системы	Синергия молекулярного метаболизма и высокого мягкотканного контраста	Минимальная лучевая нагрузка по сравнению с ПЭТ-КТ, одновременная многопараметрическая оценка	Ограниченная доступность оборудования, высокая сложность постпроцессинговой обработки

3. Проблема псевдопрогрессирования и лучевых повреждений в оценке эффективности терапии

Особую сложность в рутинной клинической практике представляет дифференциальная диагностика истинного прогрессирования опухолевого процесса и так называемого псевдопрогрессирования. На фоне проведения современных курсов иммунотерапии (ингибиторов контрольных точек иммунного ответа — анти-PD-1, анти-CTLA-4) или лучевой терапии может наблюдаться временное увеличение размеров опухолевого очага или появление новых зон накопления контраста, обусловленное массивной лимфоцитарной инфильтрацией, отеком и воспалением, а не ростом жизнеспособного клона опухолевых клеток [7].

Традиционные критерии RECIST 1.1, основанные исключительно на линейных размерах образований, в таких ситуациях демонстрируют высокую частоту ложноотрицательных или ложноположительных заключений. Для преодоления этого ограничения разработаны модифицированные критерии (iRECIST, PERCIST), учитывающие появление новых очагов и необходимость подтверждения прогрессирования при последующих контрольных точках. Сочетание перфузионной МРТ и спектроскопии позволяет дифференцировать лучевой некроз от рецидива глиальных опухолей головного мозга по соотношению холина к N-ацетиласпартату и показателям регионарного церебрального кровотока.

4. Радиомика и искусственный интеллект в количественном анализе лучевых изображений

Новейшим этапом развития лучевой диагностики является радиомика — метод автоматизированного извлечения больших объемов количественных признаков (текстурных паттернов, формы, интенсивности) из стандартных медицинских изображений КТ, МРТ или ПЭТ с последующим построением прогностических математических моделей [8].

Человеческий глаз способен оценивать лишь малую долю градаций серой шкалы на изображении. Алгоритмы машинного обучения и глубокие нейронные сети обрабатывают весь массив вокселей внутри контура опухоли, выявляя скрытые гетерогенные структуры. Это позволяет с высокой точностью прогнозировать молекулярно-генетический профиль опухоли (например, статус мутации генов или экспрессию рецепторов) без выполнения инвазивной биопсии, а также оценивать риск раннего метастазирования и резистентности к химиотерапии [3, с. 45].

5. Жидкостная биопсия и роль циркулирующих опухолевых биомаркеров как комплементарный метод лучевой визуализации

В последние годы концепция прецизионной онкодиагностики вышла далеко за рамки исключительно визуализирующих модальностей, интегрируя методы молекулярного профилирования биологических жидкостей, получившие название «жидкостной биопсии» (liquid biopsy). Несмотря на высокую разрешающую способность современных сканеров, лучевые методы обладают фундаментальным ограничением: они регистрируют макроскопические или структурно-метаболические изменения ткани, когда опухолевый клон уже насчитывает миллиарды клеток. Внедрение анализа циркулирующей опухолевой ДНК (цоДНК), циркулирующих опухолевых клеток (ЦОК) и микроРНК позволяет нивелировать этот разрыв, обеспечивая детекцию молекулярных маркеров резидуального заболевания на доклиническом этапе, за недели или месяцы до появления видимых очагов на КТ или МРТ [5]. Синергетический эффект достигается при комбинации радиологических данных с результатами секвенирования нового поколения (NGS). Например, радиомические фенотипы первичного очага, выявленные с помощью ПЭТ-КТ, коррелируют с определенными мутационными профилями цоДНК, что дает возможность неинвазивно оценивать гетерогенность опухоли во всем организме, в то время как стандартная биопсия отражает лишь локальный срез ткани. Таким образом, мультимодальный мониторинг, объединяющий высокотехнологичную лучевую

визуализацию и динамическое отслеживание циркулирующих биомаркеров, формирует надежный фундамент для своевременной коррекции лечебной стратегии и предотвращения прогрессирования резистентных форм рака.

Заключение

Современная лучевая диагностика злокачественных новообразований совершила качественный скачок от чисто описательной морфологической визуализации к прецизионному молекулярному и функциональному картированию. Интеграция мультипараметрической МРТ, гибридных методов ПЭТ-КТ и ПЭТ-МРТ, а также стандартизированных критериев оценки ответа (RECIST, PERCIST, iRECIST) позволяет выявлять опухолевые процессы на минимальных стадиях и фиксировать изменения тканевого метаболизма задолго до макроскопической динамики размеров.

Внедрение радиомических алгоритмов и систем искусственного интеллекта открывает перспективы для создания персонализированных прогностических моделей, минимизирующих субъективный фактор в интерпретации данных. Дальнейшее развитие онкорадиологии будет связано с мультидисциплинарной интеграцией радиологических, геномных и клинических данных, что обеспечит максимальную эффективность противоопухолевой терапии и улучшение отдаленных результатов выживаемости онкологических больных.

Библиографический список

1. Каприз А.Д., Старинский В.В., Петрова Г.В. Состояние онкологической помощи населению России в 2022 году. М.: МНИОИ им. П.А. Герцена — филиал ФГБУ «НМИЦ радиологии» Минздрава России, 2023. 239 с.

2. Синюкова Г.Т., Гуторов С.Л., Легкопал Е.В. Возможности перфузионной магнитно-резонансной томографии в оценке эффективности неоадъювантной химиотерапии злокачественных опухолей // Вестник рентгенологии и радиологии. 2022. Т. 103, № 2. С. 108–116.

3. Терновой С.К., Белоусов М.А. Искусственный интеллект и радиомика в лучевой диагностике // Медицинская визуализация. 2023. Т. 27, № 1. С. 40–50.

4. Тюрин И.Э. Компьютерная и магнитно-резонансная томография в диагностике заболеваний органов грудной полости. СПб.: Фолиант, 2021. 376 с.

5. Dawson S.J., Tsui D.W., Murtaza M. et al. Analysis of circulating tumor DNA to monitor metastatic breast cancer // New England Journal of Medicine. 2013. Vol. 368, no. 13. P. 1199–1209.

6. Eisenhauer E.A., Therasse P., Bogaerts J. et al. New response evaluation criteria in solid tumours: Revised RECIST guideline (version 1.1) // European Journal of Cancer. 2009. Vol. 45, no. 2. P. 228–247.

7. Hodi F.S., Hwu W.J., Kefford R. et al. Evaluation of Immune-Related Response Criteria and RECIST v1.1 in patients with advanced melanoma treated with pembrolizumab // Journal of Clinical Oncology. 2016. Vol. 34, no. 13. P. 1510–1517.

8. Lambin P., Rios-Velazquez E., Leijenaar R. et al. Radiomics: Extracting more information from medical images using advanced feature analysis // European Journal of Cancer. 2012. Vol. 48, no. 4. P. 441–446.

9. Wahl R.L., Jacene H., Kasamon Y., Lodge M.A. From RECIST to PERCIST: Evolving Considerations for PET response criteria in solid tumors // Journal of Nuclear Medicine. 2009. Vol. 50, suppl. 1. P. 122S–150S.