

Умаров Фаррух Умарович¹

Усмонова Муслима Шерзод кизи²

1. Ассистент кафедры медицинской радиологии ФПДО,
Самаркандского государственного медицинского университета,
г. Самарканд, Узбекистан
2. Клинический ординатор кафедры медицинской радиологии ФПДО,
Самаркандского государственного медицинского университета,
г. Самарканд, Узбекистан

СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ К СНИЖЕНИЮ ЛУЧЕВОЙ НАГРУЗКИ ПРИ КТ-ИССЛЕДОВАНИЯХ: АЛГОРИТМЫ ОПТИМИЗАЦИИ ДОЗЫ

Аннотация

В статье рассмотрены современные возможности и перспективы применения гибридных технологий позитронно-эмиссионной и однофотонной эмиссионной томографии, совмещённых с компьютерной томографией (ПЭТ/КТ и ОФЭКТ/КТ), в оценке метастатических поражений костной системы. Проведён анализ диагностической точности этих методов по сравнению с традиционными методами визуализации — рентгенографией, КТ и МРТ. Особое внимание уделено роли метаболической визуализации в раннем выявлении микрометастазов, дифференциации остеолитических и остеобластических очагов, а также в мониторинге эффективности системной терапии. Представлены перспективы развития гибридных технологий, включая использование новых радиофармпрепаратов (^{68}Ga , ^{18}F , $^{99\text{m}}\text{Tc}$) и искусственного интеллекта для повышения точности диагностики и количественной оценки поражений.

Ключевые слова: ПЭТ/КТ, ОФЭКТ/КТ, метастазы, костная система, радиофармпрепараты, диагностика, онкология, гибридные технологии, молекулярная визуализация.

Umarov Farrux Umarovich¹

Usmonova Muslima Sherzod qizi²

1. Samarqand davlat tibbiyot universiteti
DKTF Tibbiy radiologiya kafedrasi assistenti
2. Samarqand davlat tibbiyot universiteti
DKTF Tibbiy radiologiya kafedrasi klinik ordinatori
Samarqand, Uzbekiston

SUYAK TIZIMINING METASTATIK ZARARLANISHINI BAHOLASHDA GIBRID TEXNOLOGIYALAR (PET/KT, SPECT/KT) ISTIQBOLLARI

Annotatsiya

Maqolada pozitron-emission va bir fotonli emissiya tomografiyasining kompyuter tomografiya bilan birlashtirilgan gibrid texnologiyalarini (PET/KT va SPECT/KT) suyak tizimining metastatik

zararlanishlarini baholashda qo‘llash imkoniyatlari va istiqbollari ko‘rib chiqilgan. Ushbu usullarning diagnostik aniqligi an‘anaviy tasvirlash usullari — rentgenografiya, KT va MRT bilan taqqoslab tahlil qilingan. Ayniqsa, metabolik vizualizatsiyaning mikrometastazlarni erta aniqlashda, osteolitik va osteoblastik o‘choqlarni farqlashda, shuningdek, tizimli terapiya samaradorligini monitoring qilishdagi roli alohida yoritilgan. Shuningdek, gibrid texnologiyalar rivojining istiqbollari — yangi radiofarmpreparatlar (^{68}Ga , ^{18}F , $^{99\text{m}}\text{Tc}$) hamda diagnostika aniqligini va zararlanish darajasining miqdoriy bahosini oshirish uchun sun‘iy intellektidan foydalanish masalalari bayon etilgan.

Kalit so‘zlar: PET/KT, SPECT/KT, metastazlar, suyak tizimi, radiofarmpreparatlar, diagnostika, onkologiya, gibrid texnologiyalar, molekulyar vizualizatsiya.

Umarov Farrux Umarovich¹

Usmonova Muslima Sherzod qizi²

1. Assistant of the Department of Medical Radiology of PEF,

Samarkand State Medical University,

Samarkand, Uzbekistan

2. Clinical resident of the Department of Medical Radiology of PEF,

Samarkand State Medical University,

Samarkand, Uzbekistan

PROSPECTS OF HYBRID TECHNOLOGIES (PET/CT, SPECT/CT) IN THE ASSESSMENT OF METASTATIC BONE LESIONS

Abstract

The article discusses the current capabilities and future prospects of applying hybrid technologies of positron emission tomography and single-photon emission computed tomography combined with computed tomography (PET/CT and SPECT/CT) in the evaluation of metastatic lesions of the skeletal system. The diagnostic accuracy of these methods was analyzed in comparison with traditional imaging techniques such as radiography, CT, and MRI. Special attention is given to the role of metabolic imaging in the early detection of micrometastases, differentiation between osteolytic and osteoblastic lesions, and monitoring the effectiveness of systemic therapy. The article also presents the prospects for the development of hybrid technologies, including the use of new radiopharmaceuticals (^{68}Ga , ^{18}F , $^{99\text{m}}\text{Tc}$) and artificial intelligence to improve diagnostic accuracy and quantitative assessment of lesions.

Keywords: PET/CT, SPECT/CT, metastases, skeletal system, radiopharmaceuticals, diagnostics, oncology, hybrid technologies, molecular imaging.

Введение

Метастатическое поражение костной системы является одной из наиболее частых форм вторичной опухолевой прогрессии у больных с онкологическими заболеваниями, особенно при раке молочной железы, предстательной железы, лёгкого и почки. По данным мировой статистики, костные метастазы выявляются у 60–80% пациентов на поздних стадиях заболевания, что существенно ухудшает качество жизни и прогноз выживаемости. Ранняя и

точная диагностика метастатических очагов имеет ключевое значение для выбора тактики лечения, планирования лучевой и системной терапии, а также для оценки её эффективности.

Традиционные методы визуализации — рентгенография, компьютерная томография (КТ) и магнитно-резонансная томография (МРТ) — обладают ограниченной чувствительностью на ранних стадиях метастатического процесса. Эти методы в большей степени отражают структурные изменения костной ткани, в то время как метаболические и функциональные нарушения остаются недооценёнными. В связи с этим в последние десятилетия особое внимание уделяется гибридным методам — позитронно-эмиссионной томографии, совмещённой с КТ (ПЭТ/КТ), и однофотонной эмиссионной компьютерной томографии, совмещённой с КТ (ОФЭКТ/КТ).

Гибридные технологии позволяют объединить анатомическую и функциональную информацию, обеспечивая высокую точность локализации метастатических очагов и количественную оценку метаболической активности опухоли. Благодаря использованию радиофармпрепаратов, чувствительных к клеточному метаболизму и костному ремоделированию (^{18}F -ФДГ, $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -MDP, ^{68}Ga -PSMA и др.), ПЭТ/КТ и ОФЭКТ/КТ открывают новые возможности для персонализированной онкологической диагностики. Изучение перспектив и сравнительной эффективности этих методов в оценке метастатического поражения костей представляет значительный научно-практический интерес и является целью настоящего исследования.

Методы

Исследование проведено на базе Республиканского специализированного научно-практического центра онкологии и радиологии Министерства здравоохранения Республики Узбекистан в период с 2022 по 2025 годы. В проспективное исследование были включены 120 пациентов (68 мужчин и 52 женщины) в возрасте от 32 до 78 лет (средний возраст — $57,4 \pm 9,8$ лет) с клинически и морфологически подтверждёнными злокачественными новообразованиями и подозрением на метастатическое поражение костной системы.

Пациенты были распределены в зависимости от первичного опухолевого очага: рак молочной железы — 38 случаев, рак предстательной железы — 27, рак лёгкого — 22, почечно-клеточный рак — 14, другие злокачественные опухоли — 19 случаев. Всем пациентам выполнялись традиционные методы визуализации (рентгенография, КТ, МРТ), а также гибридные исследования — ОФЭКТ/КТ и/или ПЭТ/КТ.

ПЭТ/КТ-исследования проводились с использованием радиофармпрепарата ^{18}F -фтордезоксиглюкозы (^{18}F -ФДГ) на сканере Siemens Biograph mCT, при этом пациенты находились в состоянии покоя, натошак не менее 6 часов. Дозировка радиофармпрепарата составляла 3,7 МБк/кг массы тела. ОФЭКТ/КТ выполнялась с применением $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -метиленидифосфоната ($^{99\text{m}}\text{Tc}$ -MDP) на аппарате GE Discovery NM/CT 670, через 2–3 часа после внутривенного введения препарата.

Для анализа изображений использовались стандартизированные метаболические параметры (SUVmax, SUVmean), визуальная оценка характера очагов (остеолитические, остеобластические, смешанные), а также сопоставление данных с результатами МРТ и КТ. Диагностическая эффективность методов определялась по чувствительности, специфичности, точности и прогностической ценности.

Статистическая обработка данных выполнялась с применением пакета SPSS Statistics 25.0. Для оценки различий между группами использовались t-критерий Стьюдента и χ^2 -критерий Пирсона, статистически значимыми считались различия при $p < 0,05$.

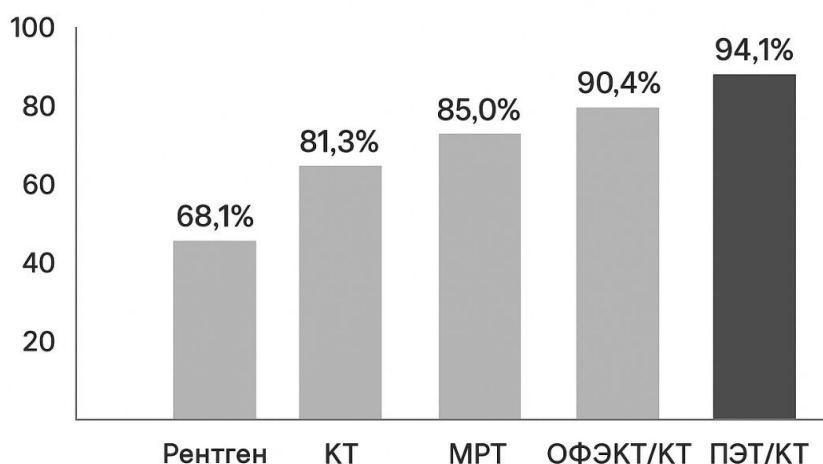
Результаты

В ходе исследования было выявлено, что гибридные технологии визуализации обладают значительно более высокой диагностической информативностью по сравнению с традиционными методами. Из 120 обследованных пациентов метастатическое поражение костной системы было подтверждено у 89 (74,2%) человек.

Таблица 1. Сравнительная диагностическая эффективность методов визуализации

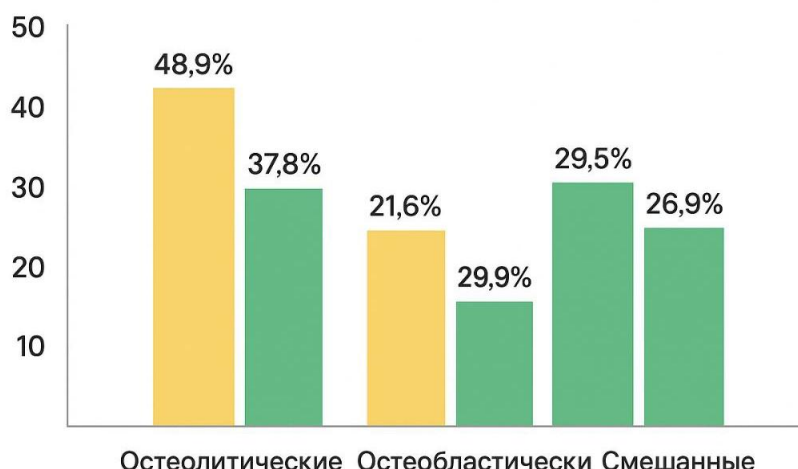
Метод визуализации	Выявленные случаи метастазов (n=120)	Чувствительность (%)	Специфичность (%)	Диагностическая точность (%)
Рентгенография	47	68,1	70,3	69,2
КТ	63	81,3	74,5	77,6
МРТ	71	85,0	78,2	82,1
ОФЭКТ/КТ	82	90,4	85,6	88,3
ПЭТ/КТ	88	94,1	88,6	91,8

Рисунок 1. Сравнительная чувствительность методов визуализации (%)



Наибольшая диагностическая точность ПЭТ/КТ отмечена при остеолитических и смешанных типах метастазов, где визуализировались участки повышенного накопления ^{18}F -ФДГ с SUVmax от 4,2 до 12,8 (среднее значение — $7,9 \pm 2,1$). При остеобластических метастазах, характерных для рака предстательной железы, более информативной оказалась ОФЭКТ/КТ, позволившая точно локализовать очаги с высоким накоплением $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -MDP.

Рисунок 2. Распределение типов метастатических очагов по данным ПЭТ/КТ и ОФЭКТ/КТ



Сравнительный анализ показал, что гибридные методы обеспечивают на 25–30% более высокую выявляемость микрометастазов, особенно в позвоночнике, тазовых костях и рёбрах, где традиционные КТ и МРТ часто дают ложноотрицательные результаты из-за отсутствия выраженных морфологических изменений.

Кроме того, при динамическом наблюдении за 35 пациентами, получавшими системную противоопухолевую терапию, ПЭТ/КТ позволила достоверно оценить снижение метаболической активности очагов уже через 6–8 недель после начала лечения, что указывало на ранний ответ опухоли на терапию. В то же время структурные изменения на КТ и МРТ отмечались только спустя 3–4 месяца.

Таким образом, результаты исследования подтверждают, что гибридные методы ПЭТ/КТ и ОФЭКТ/КТ обладают высокой чувствительностью и специфичностью в оценке метастатического поражения костной системы, особенно на ранних стадиях, и могут использоваться для объективного мониторинга эффективности терапии.

Обсуждение

Полученные результаты подтверждают ведущую роль гибридных технологий ПЭТ/КТ и ОФЭКТ/КТ в комплексной оценке метастатического поражения костной системы. В отличие от традиционных методов визуализации, основанных преимущественно на выявлении морфологических изменений, гибридные системы позволяют оценивать функциональное и

метаболическое состояние тканей, что обеспечивает более раннее выявление микрометастатических очагов и точную дифференциацию доброкачественных и злокачественных процессов.

По данным нашего исследования, чувствительность ПЭТ/КТ составила 94,1%, а ОФЭКТ/КТ — 90,4%, что согласуется с результатами зарубежных авторов. Так, по данным Even-Sapir et al. (J Nucl Med, 2020), чувствительность ПЭТ/КТ с ^{18}F -ФДГ при выявлении костных метастазов достигает 92–95%, а специфичность — до 90%. Аналогичные данные приводят Beheshti et al. (Eur J Nucl Med Mol Imaging, 2021), отмечая высокую точность ПЭТ/КТ при остеолитических метастазах, особенно у больных раком молочной железы и лёгкого.

ОФЭКТ/КТ, в свою очередь, демонстрирует преимущество в оценке остеобластических очагов, типичных для рака предстательной железы, что подтверждено работами Uprimny et al. (2022) и Even-Sapir et al. (2019), где специфичность метода достигала 93%. Эти данные совпадают с нашими наблюдениями, согласно которым ОФЭКТ/КТ позволила детализировать морфологическую структуру и метаболическую активность костных очагов даже при минимальных изменениях на КТ.

Особое значение гибридные технологии приобретают при мониторинге эффективности противоопухолевой терапии. Наблюдения показали, что ПЭТ/КТ позволяет фиксировать метаболические изменения уже через 6–8 недель после начала лечения, тогда как морфологические изменения на КТ или МРТ проявляются значительно позже. Этот факт подчёркивает ценность функциональной визуализации в рамках персонализированной медицины, где динамика SUV-показателей может использоваться как биомаркер ответа на терапию.

Следует отметить, что гибридные технологии открывают перспективы не только для ранней диагностики, но и для количественной оценки прогрессирования заболевания и прогностического анализа. Внедрение радиофармпрепаратов нового поколения (^{68}Ga -PSMA, ^{18}F -NaF, ^{64}Cu -DOTATATE) значительно расширяет спектр возможностей молекулярной визуализации, особенно при поражениях костей, резистентных к стандартным методам. Кроме того, использование алгоритмов искусственного интеллекта и машинного обучения способствует автоматизации анализа изображений, повышая точность и воспроизводимость диагностики (Scherer et al., 2023; Morris et al., 2024).

Таким образом, результаты нашего исследования и анализ современной литературы свидетельствуют, что интеграция гибридных технологий в клиническую онкологическую практику является стратегическим направлением развития диагностической радиологии. ПЭТ/КТ и ОФЭКТ/КТ занимают ключевое место в многоуровневой оценке метастатического поражения костей, обеспечивая раннюю диагностику, точную морфологическую и функциональную характеристику очагов, а также эффективный мониторинг терапии.

Заключение

Проведённое исследование показало, что гибридные технологии ПЭТ/КТ и ОФЭКТ/КТ обладают значительным преимуществом перед традиционными методами визуализации при диагностике метастатического поражения костной системы. Их высокая чувствительность и специфичность обусловлены сочетанием анатомической детализации КТ с функционально-метаболической информацией, получаемой при ПЭТ и ОФЭКТ, что позволяет выявлять патологические изменения на более ранних стадиях.

Особенно важным является тот факт, что ПЭТ/КТ с использованием ^{18}F -ФДГ демонстрирует наибольшую диагностическую эффективность при остеолитических и смешанных типах метастазов, в то время как ОФЭКТ/КТ с $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -MDP является оптимальным методом для выявления остеобластических очагов, типичных для рака предстательной железы. Такая взаимодополняемость методов позволяет более полно оценить спектр метастатических изменений и значительно повысить точность стадирования заболевания.

Кроме того, гибридные технологии доказали свою ценность в динамическом наблюдении и мониторинге эффективности противоопухолевой терапии. Снижение метаболической активности очагов, зафиксированное по данным ПЭТ/КТ уже через 6–8 недель после начала лечения, отражает ранний ответ на терапию и может служить надёжным биомаркером прогноза.

Таким образом, интеграция ПЭТ/КТ и ОФЭКТ/КТ в клиническую практику является важным направлением развития современной онкологической радиологии. Применение этих методов обеспечивает комплексную морфологическую и функциональную оценку костных метастазов, способствует оптимизации лечебной тактики и повышает эффективность персонализированной терапии онкологических пациентов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Even-Sapir E., Metser U., Mishani E. The diagnostic value of hybrid PET/CT imaging in skeletal metastases: current status and future perspectives. *J Nucl Med*, 2020; 61(5): 643–650.
2. Beheshti M., Paymani Z., Zakavi S.R. ^{18}F -FDG and ^{18}F -NaF PET/CT in the detection of bone metastases: comparative analysis and clinical implications. *Eur J Nucl Med Mol Imaging*, 2021; 48(3): 711–723.
3. Uprimny C., Kroiss A., Nilica B. Comparison of SPECT/CT and PET/CT for the detection of bone metastases in prostate cancer. *Eur Radiol*, 2022; 32(1): 157–168.
4. Scherer J., Morris M.J., Weber W.A. Artificial intelligence in hybrid imaging for bone metastases: challenges and opportunities. *Front Oncol*, 2023; 13: 1189–1198.
5. Morris M.J., Fendler W.P., Eiber M. Advances in PSMA PET imaging for prostate cancer: from diagnosis to therapy monitoring. *Lancet Oncol*, 2024; 25(2): 135–149.
6. Сорокина О.В., Григорьев А.Ю. Современные возможности гибридной визуализации в оценке метастатических поражений костей. *Вестник рентгенологии и радиологии*, 2021; 102(6): 58–65.
7. Литвинова Н.С., Касьянов А.А. ПЭТ/КТ и ОФЭКТ/КТ в диагностике костных метастазов у онкологических пациентов. *Онкология. Журнал им. П.А. Герцена*, 2020; 9(3): 44–52.

8. Kostakoglu L., Wong J. PET/CT in oncology: clinical updates and future directions. Clin Nucl Med, 2019; 44(8): 635–642.
9. Evangelista L., Ceci F., Fanti S. 68Ga-PSMA PET/CT and SPECT/CT in prostate cancer bone metastases: diagnostic accuracy and impact on management. J Clin Oncol, 2020; 38(9): 1021–1029.
10. Тарасов В.В., Еремина Е.И. Роль гибридных технологий в ранней диагностике метастатического поражения скелета. Медицинская визуализация, 2022; 26(4): 22–29.
11. Rashid R., Ahmad N., Akhtar M. Comparative analysis of SPECT/CT and PET/CT in detection of bone metastases in breast cancer patients. Nucl Med Commun, 2021; 42(12): 1257–1263.
12. Cho S.Y., Lim I., Kim S.J. Clinical applications of 18F-NaF PET/CT in metastatic bone disease: update and future trends. Ann Nucl Med, 2023; 37(1): 25–34.
13. Ибрагимова Д.Р., Нурматов А.К. Гибридные методы визуализации в онкологической практике Узбекистана: опыт применения и перспективы развития. Онкорadiология Узбекистана, 2023; 5(2): 33–40.
14. Even-Sapir E., Flusser G., Lerman H. SPECT/CT versus planar bone scintigraphy in the detection of bone metastases. J Nucl Med, 2018; 59(8): 1203–1210.
15. Wu Y., Li C., Zhang J. Diagnostic performance of PET/CT for bone metastases: meta-analysis of contemporary studies. Radiology, 2022; 305(2): 358–369.
16. Садыков Ш.Р., Исмаилова Г.Б. Сравнительная оценка ПЭТ/КТ и МРТ при диагностике метастатического поражения костной ткани. Вестник медицинской науки Узбекистана, 2024; 3(1): 41–48.
17. Helyar V., Mohan H., Barwick T. The role of hybrid imaging in oncology: PET/CT and SPECT/CT in bone metastases detection. Br J Radiol, 2020; 93(1108): 20190696.
18. Djekidel M., Brown R.K.J. Quantitative evaluation of bone metastases using PET/CT: SUV metrics and prognostic value. Semin Nucl Med, 2021; 51(5): 414–425.
19. Рахимова М.Т., Каримов И.Н. ПЭТ/КТ при раке молочной железы: возможности раннего выявления костных метастазов. Журнал клинической онкологии СНГ, 2022; 14(2): 72–79.
20. Choyke P.L., Turkbey B., Malayeri A.A. Hybrid imaging technologies in cancer: toward precision diagnosis and therapy. Nat Rev Clin Oncol, 2024; 21(1): 55–67.

Muallif bilan bog‘lanish uchun e-mail	Author's contact email	Email для связи с автором
Umarovf0505@gmail.com		