

## Гибридные системы ПЭТ/МРТ в онкологии: настоящее и будущее

Д.А. Джужа

Национальный институт рака МЗ Украины

Основным направлением развития диагностической техники в радиологии в 90-х годах прошлого века явилось создание гибридных систем, в которых отдельные методы визуализации соединялись в один инструмент, обеспечивающий за одно исследование комбинированный набор данных, что дает возможность преодолеть ограничения и недостатки отдельных технологий. В 1998 году в клиническую практику была внедрена гибридная система, сочетающая позитронную эмиссионную томографию и компьютерную томографию (ПЭТ/КТ). За прошедшее время она получила признание как метод визуализации, обеспечивающий в онкологии наиболее высокую точность при стадировании и оценке эффективности лечения по сравнению с отдельно выполняемыми позитронной эмиссионной томографией (ПЭТ) и компьютерной томографией (КТ) [37, 43].

ПЭТ имеет относительно низкое пространственное разрешение, но обладает уникальной способностью непосредственно оценивать метаболизм на клеточном уровне и демонстрировать генную и рецепторную экспрессию. Точное сопоставление участков накопления позитронизлучающих радиофармпрепаратов (РФП) с детальной анатомической картиной будет иметь особое значение для существующих и будущих радионуклидных маркеров, имеющих тенденцию обеспечивать все меньшей фоновой анатомической информацией и все больше специфическими данными [17, 47].

При получении анатомической информации магнитно-резонансная томография (МРТ) имеет определенные преимущества перед КТ. Метод обеспечивает более контрастное изображение мягких тканей даже без применения контрастных средств, дает возможность проводить магнитно-резонансную (МР) спектроскопию и ангиографию, получать диффузионно-взвешенные, перфузионные и функциональные изображения. Замещение КТ магнитно-резонансной томографией позволяет существенно

снизить лучевые нагрузки на пациентов, что может явиться важным моментом в педиатрической практике. В то же время недостатками ПЭТ/МРТ могут считаться высокая стоимость и относительно низкая пропускная способность, особенно если используется весь потенциал МРТ. Исследование может быть проведено не у всех пациентов, противопоказаниями являются большинство типов сердечных водителей ритма, имплантированные дефибрилляторы, некоторые имплантаты, стенты, клипсы [47].

Несмотря на значительный интерес, который представляет МРТ для гибридных систем, разработка ПЭТ/МРТ заняла достаточно длительное время. Синхронные ПЭТ/МРТ изображения были впервые предложены в 1997 году [39]. В последующем концепция сочетания ПЭТ и МРТ в одном исследовании была технически и методически усовершенствована сначала на экспериментальных животных, а в 2006 году – на человеке. В то время как ПЭТ/КТ быстро получила широкое распространение: в течение трех лет после выхода на рынок уже было установлено более 500 аппаратов, а к 2016 году в мире работало более 5000 систем, адаптация ПЭТ/МРТ проходила медленно. После внедрения в 2007 году первого прототипа, предназначенного для исследования головного мозга, и установки во всем мире еще 5 аппаратов, в 2011 году были введены в эксплуатацию первые коммерческие ПЭТ/МРТ системы всего тела. Два полностью интегрированных аппарата ПЭТ/МРТ были запущены в 2011 и 2014 годах. В 2016 году во всем мире было установлено только около 70 ПЭТ/МРТ систем трех производителей [5, 20, 46].

### Гибридные системы ПЭТ/МРТ

Причиной задержки внедрения ПЭТ/МРТ явились сложные инженерные проблемы, связанные с объединением ПЭТ и МРТ в один сканер, которые в течение ряда лет удалось преодолеть не-

скольким исследовательским группам. Если для МР-сканеров были необходимы только незначительные изменения, то обычные ПЭТ-детекторы не могли работать вблизи сильных магнитных полей. Электронные блоки требовали защиты от статических магнитных полей, изменяющегося градиента поля и радиочастотных импульсов МРТ. Для решения этой проблемы была сделана замена ПЭТ-детекторов с фотоумножителях детекторами с лавинными фотодиодами на основе оксиортосиликата лютеция или полупроводниковыми кремниевыми детекторами, которые не подвержены влиянию магнитных полей, что позволило интегрировать их в МР-сканер. В результате проведенных разработок стала возможной работа компонентов ПЭТ в сильных магнитных полях, и, таким образом, получение высококачественных МР-изображений даже в первых гибридных системах для клинических исследований [29, 31, 38, 40].

Другой проблемой, которая требовала решения в системах ПЭТ/МРТ, было обеспечение достаточной информацией для проведения коррекции аттенуации (КА) при ПЭТ. Получаемые при КТ данные основаны на аттенуации фотонов рентгеновского излучения, проходящего через тело пациента, и легко могут быть модифицированы для оценки аттенуации, которой подвергаются фотоны аннигиляции РФП при прохождении от места аннигиляции к детекторам. Этот принцип и положен в основу коррекции аттенуации данных ПЭТ в гибридных системах ПЭТ/КТ. Поскольку МР-изображения получаются не в результате оценки фотонной аттенуации, а при измерении возбуждения протонного спина, существовала проблема расчета величин аттенуации по данным МРТ. Были разработаны несколько способов применения данных МРТ для создания карт КА, основные из которых – сегментационный и атласный методы. Сегментационный алгоритм основан на разделении тканей для получения карты коррекции аттенуации на 4 класса (воздух, легкие, жировая ткань, мягкие ткани). При таком подходе в результате дыхательных и сократительных движений могут возникать ошибки, связанные с оценкой костной ткани как мягкотканного компонента. Атласный подход основан на ретроспективном дополнении магнитно-резонансной коррекции данными о костной ткани. Однако, поскольку этот способ коррекции требует предварительной информации о стандартизированной анатомии человека и последующего соот-

ношения ее с реальными данными пациента, он мало эффективен, когда анатомия исследуемого отличается от нормальной (анатомические варианты, большие с большими опухолями, посттерапевтические изменения тканей и т.д.).

Хотя существуют возможности для улучшения точной КА при ПЭТ/МРТ, и ведутся интенсивные исследования в этой области, предлагаемые в настоящее время способы коррекции, основанные на методах сегментации, игнорирующих костную ткань, достаточно хорошо приспособлены к клиническим исследованиям и надежны. Не нужно забывать, что после нескольких лет совершенствования КА для ПЭТ/КТ остаются определенные недостатки и ограничения, которые хорошо известны рентгенологам и специалистам ядерной медицины и могут быть легко учтены при оценке изображений [3, 10, 44].

В ходе разработки ПЭТ/МРТ существовали три концепции компоновки систем: 1) отдельные ПЭТ-, ПЭТ/КТ- и МР-детекторы, работающие в отдельных помещениях, пациент перемещается от одной системы к другой без изменения положения; 2) ПЭТ- и МР-детекторы, установленные на главной оси сканирования, с вращающимся ложем для пациента, расположенным между детекторами; 3) полностью интегрированные ПЭТ/МРТ системы с одновременным сбором данных. В первых двух типах компоновки электромагнитное влияние МРТ устранялось без существенных технических изменений. Другими преимуществами были возможность независимого использования модальностей и их усовершенствование. Недостатками являлись возможная дезинтеграция изображений в связи с изменением положения пациента и органов, невозможность одновременного сбора информации, необходимость больших площадей для установки систем. При третьей компоновке фотодиодные или полупроводниковые ПЭТ-детекторы встраиваются непосредственно в МР-детектор, что обеспечивает сбор МР-последовательностей во время ПЭТ-сканирования. При такой схеме регистрации данных существенно сокращается время исследования, дезинтеграция изображений сводится к минимуму, КА может быть выполнена по алгоритмам, основанным на сегментационном или атласном методах [3, 10].

К порядку проведению ПЭТ/МРТ исследований существуют три основных подхода. Во-первых, сбор МР-последовательностей для КА и проведение ПЭТ как можно быстрее для каж-

дого положения больного. Во-вторых, проведение дополнительных морфологических МРТ последовательностей в специфических положениях в зависимости от клинических запросов, и третий – проведение дополнительного полного МР-исследования всего тела так, как оно проводится только для МРТ всего тела. При проведении ПЭТ/МРТ могут выполняться различные МР-последовательности, но сбор большого их числа удлиняет время исследования и уменьшает пропускную способность, поэтому особенно важна разработка оптимальных протоколов исследования. Протоколы, использующие функциональные возможности МРТ сложны для выполнения, информация, предоставляемая диффузионно-взвешенными изображениями (ДВИ) может излишней при проведении ФДГ-ПЭТ. Тем не менее, ДВИ могут обеспечить полезной информацией при ПЭТ/МРТ с высокоспецифичными метаболическими и рецепторными РФП для идентификации изменений в опухолевых клетках при оценке эффективности терапии. Роль функциональных МР-протоколов в гибридных системах в диагностическом обеспечении онкологических больных еще не оценена. Необходимы дальнейшие исследования для определения наиболее информативных МР-последовательностей при использовании ПЭТ с таргетными РФП [23, 24, 42, 45].

Несмотря на множество публикаций о потенциале гибридных систем ПЭТ/МРТ, все еще мало клинических доказательств в пользу преимуществ этой модальности по сравнению с апробированными способами диагностики [4, 8, 9, 29, 42].

### Клиническая эффективность ПЭТ/МРТ

Выполнен анализ международного применения ПЭТ/МРТ в клинической и исследовательской работе 39 центров с целью определения сильных и слабых сторон метода и причин его медленной адаптации [46]. Анализ проводился на основе анкетного опроса. Из общего числа респондентов 62 % располагалось в Европе, 23 % – в Северной Америке, 16 % – в странах Дальнего Востока. Системы ПЭТ/МРТ производства Siemens Healthcare составляли 77 %, Phillips Healthcare – 13 %, GE Healthcare – 10 %. Наибольшее число аппаратов было установлено в государственных и общественных учреждениях

академической направленности – 67 %. Количество клинических и научных исследований было приблизительно одинаковым – 47 и 45 %.

Онкологические заболевания преобладают в клиническом и научном применении ПЭТ/МРТ, составляя соответственно 88 и 76 %, на втором месте – неврологические заболевания, соответственно 12 и 9 %, на третьем – сердечно-сосудистые – 6 и 3 %. Среди онкологических больных первые три места по частоте занимают пациенты с раком простаты, опухолями головного мозга, раком головы и шеи, для которых МРТ является морфологической модальностью выбора. Такой подход оправдан, если исследование экономически целесообразно и может быть выполнено у пациента. В то же время этот ряд показаний подчеркивает существующий недостаток новых направлений применения полностью интегрированной ПЭТ/МРТ.

Длительность типичной ПЭТ/МРТ составляет около 45-60 мин, что в 2 раза дольше, чем при ПЭТ/КТ, а пропускная способность за неделю – 8-12 пациентов, что в 5 раз ниже, несмотря на одинаковый штат [2]. Очевидно, что это различие связано с большей сложностью проведения МР-компонента и интеграции его с ПЭТ. Протоколы ПЭТ/МРТ четко не определены, главным образом, в связи с вариабельностью протоколов МРТ. МР-протоколы для онкологических исследований часто включают изображения, сформированные с использованием метода Dixon, ДВИ и последовательности для волнометрических исследований с задержкой дыхания. Около двух третей центров выполняют дополнительные МР-исследования после ПЭТ/МРТ.

Наиболее часто применяемыми РФП для всех категорий исследований были  $^{18}\text{F}$ -фтордезоксиглюкоза ( $^{18}\text{F}$ -ФДГ),  $^{13}\text{N}$ - $\text{NH}_3$ ,  $^{18}\text{F}$ -фторэтилтирозин ( $^{18}\text{F}$ -ФЭТ) и лиганды простатспецифического мембранного антигена. В кардиологии, онкологии и неврологии  $^{18}\text{F}$ -ФДГ остается главным радиофармпрепаратом для ПЭТ/МРТ. В онкологии лиганды простатспецифического мембранного антигена занимают третье место, опережая аналоги холина и соматостатиновые лиганды. Это положение относительно нового РФП подчеркивает значимость применения ПЭТ/МРТ у больных раком простаты.

Интерпретация результатов ПЭТ/МРТ более проблематична, чем при ПЭТ/КТ, если при ПЭТ/КТ совместная оценка данных радиологом и специалистом ядерной медицины проводилась в 40 % исследований, то при ПЭТ/МРТ – в 80 %.

Проведен анализ причин назначенных, но не выполненных ПЭТ/МРТ исследований [7]. Из общего числа 238 больных в 11,8 % исследования не были выполнены, в этой группе 3,4 % от общего числа больных оказались от исследования, у 3,8 % невозможно было ввести РФП, у 4,6 % РФП был введен, но исследование не было завершено. Последний сценарий наихудший, обычно он связан с непредвиденными нарушениями работы ПЭТ- и МРТ-сканеров и программного обеспечения, не предполагаемой клаустрофобией, болевым синдромом, сбоями в электроснабжении помещений. Многие из этих причин были характерны только для ПЭТ/МРТ. Клаустрофобия обычно не является причиной отказа от исследования в сканерах ПЭТ/КТ или специализированных МР-сканерах с минимальным покрытием катушками, но может быть существенной для ПЭТ/МРТ-сканеров с дополнительными катушками, большим временем сканирования и меньшим диаметром туннеля детектора. Новые гибридные системы с более сложным оборудованием и программным обеспечением в сочетании с меньшим опытом технического персонала имеют большую вероятность нарушений работы и требуют больше времени для восстановления. Большинство сбоев диагностического процесса можно избежать тщательным отбором пациентов, премедикацией клаустрофобии и должным проведением контроля качества систем в начале рабочего дня.

Выполнен анализ 46 работ (2340 больных), посвященных сравнению диагностической эффективности гибридных систем ПЭТ/КТ и ПЭТ/МРТ у онкологических больных [42]. Приведенные данные показывают, что ПЭТ/МРТ протоколы применимы при большинстве злокачественных опухолей. Явные диагностические преимущества ПЭТ/МРТ в тех случаях, когда МРТ используется преимущественно для получения общей фоновой анатомической структуры, не установлены. Обычно в исследованиях, посвященных сопоставлению результатов ПЭТ/МРТ и ПЭТ/КТ, отмечается эквивалентная диагностическая точность методов. Как правило, незначительное превышение отдельных диагностических показателей ПЭТ/МРТ статистически не достоверно (рис. 1) [16, 22, 26].

При диагностике злокачественных опухолей головы и шеи ПЭТ/МРТ может быть более информативной в T-стадировании, особенно, если предполагается инфильтрация первичной опухолью прилегающих структур [15, 37]. Более

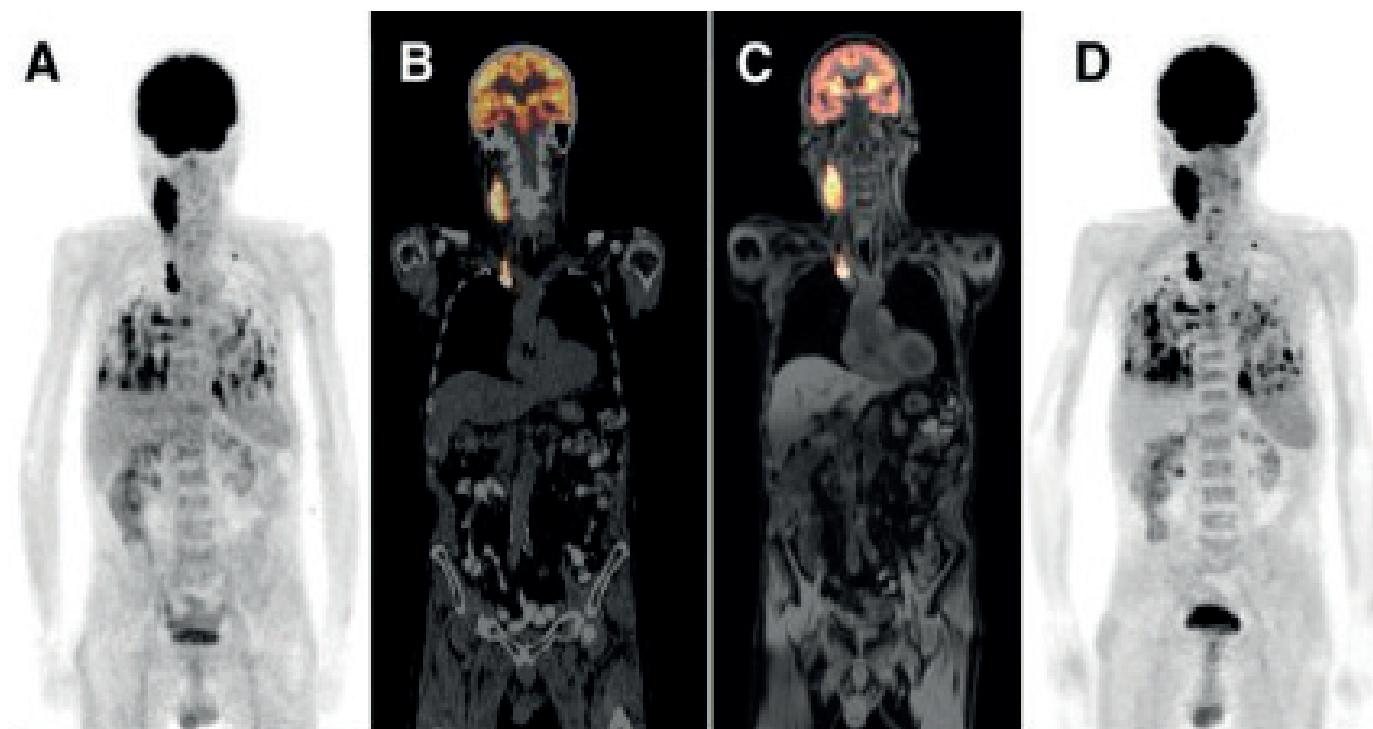
точное определение T-стадии отмечено при раке грудной железы за счет лучшего контрастирования мягких тканей, при этом различия в N- и M-стадировании не обнаружено [30].

Качество изображений и точность диагностики поражений легких диаметром 10 мм и более у онкологических больных при  $^{18}\text{F}$ -ФДГ-ПЭТ/МРТ были аналогичными результатам  $^{18}\text{F}$ -ФДГ-ПЭТ/КТ. Однако, в связи с более низкой чувствительностью ПЭТ/МРТ при легочных очагах менее 10 мм, общая точность метода при использовании контрастирования и T1-взвешенных 3D объемно-интерполированных последовательностей остается более низкой. Стадирование на основе ПЭТ/МРТ несет риск пропуска мелких первичных опухолей и легочных метастазов [11, 21, 28, 34].

При стадировании колоректального рака (КРР) отмечена несколько большая точность ПЭТ/МРТ в оценке T-стадии по сравнению с ПЭТ/КТ, однако это различие не было статистически достоверно. В диагностике метастазов КРР в печень точность ПЭТ/МРТ оказалась выше, чем ПЭТ/КТ (соответственно 74 % и 56 %,  $p < 0,01$ ), однако, общая чувствительность, специфичность и точность модальностей при N- и M-стадировании статистически не отличались. Необходимы дальнейшие исследования с большим числом наблюдений [1, 13].

При диагностике метастазов в печень ПЭТ/МРТ с ДВИ и динамическими МР-последовательностями с контрастированием показала большую чувствительность, чем ПЭТ/КТ, что потенциально могло влиять на лечебную тактику у 10 % больных. Однако в связи с увеличением ложноположительных результатов при использовании сложных МР-последовательностей нет четкого представления, имеет ли ПЭТ/МРТ какие-либо преимущества перед ПЭТ/КТ в оценке поражений печени [33]. ПЭТ/МРТ по данным авторов оказалась более чувствительной, чем ПЭТ/КТ в диагностике очаговых поражений печени, но ни у одного из больных исследование не привело к изменению стадии онкологического процесса [19].

В диагностике рака предстательной железы ПЭТ/МРТ с  $^{11}\text{C}$ - и  $^{18}\text{F}$ -холином или простатспецифическим мембранным антигеном, меченым  $^{68}\text{Ga}$  ( $^{68}\text{Ga}$ -ПСМА), имеет диагностическую эффективность эквивалентную или несколько выше, чем ПЭТ/КТ [25, 35, 48]. В то же время у больных раком предстательной железы ПЭТ/МРТ имеет значительный потенциал, обеспе-



**Рис. 1.** Сопоставление результатов ПЭТ/КТ и ПЭТ/МРТ, проведенных в один и тот же день у больного с метастазами рака щитовидной железы. (А) Максимально контрастированное ПЭТ-изображение с  $^{18}\text{F}$ -ФДГ, полученное на ПЭТ/КТ-сканере. (В) Совмещение данных ПЭТ (оранжевый спектр) и низкодозной КТ. (С) Совмещение ПЭТ и МРТ Dixon-изображений, полученных на ПЭТ/МРТ-сканере. (D) Максимально контрастированное ПЭТ-изображение с  $^{18}\text{F}$ -ФДГ, полученное на ПЭТ/МРТ-сканере. Очевидно сходство изображений патологических участков в области шеи, средостения и легких на рисунках А и D [26].

чивая более точную биопсию и терапию, улучшая стадирование и диагностику при биохимических рецидивах. ПЭТ/МРТ может давать информацию, которой не обеспечивает ПЭТ/КТ и которая может существенно менять тактику лечения [6, 14].

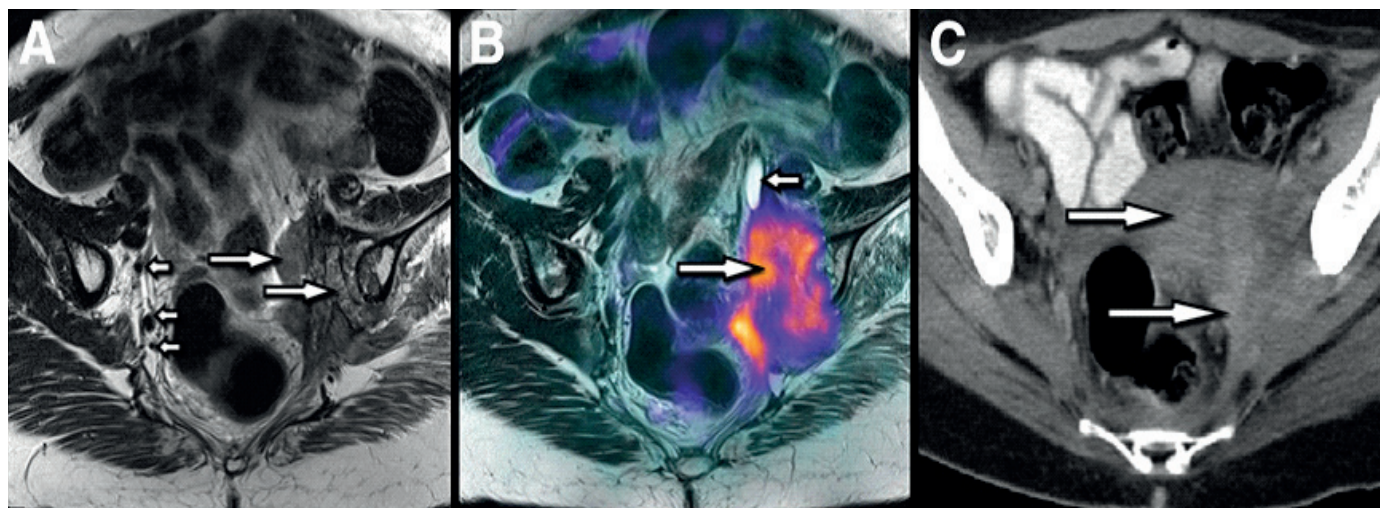
В диагностике злокачественных опухолей костей, несмотря на то, что чувствительность ПЭТ/МРТ и ПЭТ/КТ была почти одинаковой, определение границ поражения значительно лучше при ПЭТ/МРТ, которая способна обеспечить более высокую точность при диагностике первичных костных опухолей, начальной инфильтрации костного мозга, низком накоплении РФП [12, 27].

В педиатрической онкологии, если не учитывать значительное снижение лучевых нагрузок на пациентов, явных преимуществ ПЭТ/МРТ перед ПЭТ/КТ не обнаружено, хотя дополнительная информация, даваемая МРТ, может влиять на тактику ведения больных [41]. По сравнению с отдельно проводимыми ПЭТ и МРТ симультанная ПЭТ/МРТ, как первый шаг

обследования, не только позволяет улучшить качество изображений, но и может быть более комфортной для детей, поскольку уменьшает общее время исследований, повторные седации и анестезии, снижает беспокойство пациента. Применение функциональных МР-методик при ПЭТ/МРТ может иметь в педиатрической практике существенное значение, особенно при рестадировании и оценке эффективности противоопухолевой терапии [32].

В группе пациентов с различными типами опухолей ретроспективная оценка результатов ПЭТ/МРТ показала существенное дополнительное влияние метода на лечебную тактику. Дополнительная диагностическая информация была получена у 41,0 % обследованных, у 23,1 % она была определена как несущественная, у 17,9 % – как значимая [6]. По данным авторов при сопоставлении данных ПЭТ/КТ и ПЭТ/МРТ, проведенных последовательно у одних и тех же онкологических больных, ПЭТ/МРТ-изображения позволили более точно определить анатомиче-





**Рис. 2.** Больная 76 лет с подозрением на рецидив шейки матки после лечения. (А) На аксиальном косом T2-взвешенном изображении мягкотканое поражение (длинные стрелки) с вовлечением левой стенки таза и левой подвздошной кости. Сопоставление с противоположной стороной (короткие стрелки) указывает на перинеуральную и васкулярную опухолевую инфильтрацию. (В) На совмещенном  $^{18}\text{F}$ -ФДГ ПЭТ и T2-взвешенном аксиальном косом изображении в левой половине таза определяется мягкотканая опухоль, накапливающая  $^{18}\text{F}$ -ФДГ, которая распространяется через седалищную вырезку, вызывая вторичный гидроуретер (короткая стрелка), и поражает левую седалищную кость. (С) На аксиальном КТ-изображении визуализируется мягкотканое образование без четких границ и видимой нейроваскулярной инфильтрации (длинные стрелки), распространяющееся на левую стенку таза [35].

скую локализацию в 5,1 % наблюдений, у 10 % пациентов уточнена стадия (рис. 2) [35].

Несмотря на недостаток ключевых показаний и необходимость дальнейшего совершенствования, более 50 % специалистов, работающих на ПЭТ/МРТ, прогнозируют существенный рост вклада ПЭТ/МРТ в клинические исследования в ближайшие 5 лет. Более 15 % радиологов считают это возможным только через десятилетие. Пользователи ПЭТ/МРТ уверены в потенциале этой технологии, имеющем преимущества над ПЭТ/КТ в главных клинических направлениях, хотя явных доказательств такого превосходства все еще нет. Учитывая широкое использование ПЭТ/КТ и ее приемлемую стоимость для онкологических исследований, остается спорным, произойдет ли значительное увеличение использования ПЭТ/МРТ у онкологических больных [42, 46].

Тем не менее, ПЭТ/МРТ сейчас находится на ранней стадии внедрения с несколькими нерешенными проблемами технического, методического и организационного характера. Существует необходимость в разработке коротких и эффективных протоколов сбора, последовательностей для точной костной сегментации для КА при МРТ всего тела, требуют усовершенствования

специальные МР-протоколы и определения их роли и места в зависимости от задач исследования. Необходимы дальнейшие исследования для раскрытия потенциала сочетания ПЭТ с такими мультипараметрическими исследованиями, как динамические контрастированные изображения, ДВИ, МР-спектроскопия, для оценки эффективности противоопухолевой терапии. Должны быть оценены возможности гиперполяризованной МРТ и эффективность применения новых МР-контрастных средств (наночастицы оксида железа, липосомы).

Существенным препятствием для распространения ПЭТ/МРТ является их высокая стоимость. В настоящее время только 3 производителя выпускают системы ПЭТ/МРТ, и только две из них являются полностью интегрированными, обеспечивающими одновременную ПЭТ и МРТ. Средняя цена систем ПЭТ/МРТ составляет 5-7 миллионов долларов США, тогда как ПЭТ/КТ премиум-класса стоит половину от этой суммы и меньше [16, 25].

Таким образом, усовершенствование гибридных систем ПЭТ/МРТ привело в последние 5 лет к прогрессивному увеличению количества работающих установок. Поскольку ПЭТ/МРТ яв-

ляется инновационной технологией, ее место в клинической практике еще четко не определено. Сегодняшние пользователи этой модальности являются первопроходцами и их схемы использования ПЭТ/МРТ позволяют получить видение современных и будущих ключевых направлений.

Главные преимущества ПЭТ/МРТ перед ПЭТ/КТ – высококонтрастное изображение мягких тканей, возможность оценки функциональных параметров тканей, в первую очередь васкуляризации и перфузии, снижение суммарной лучевой нагрузки. Основная область применения ПЭТ/МРТ в настоящее время – онкология. Метод может быть использован при большинстве злокачественных опухолей. Диагностические преимущества ПЭТ/МРТ показаны, прежде всего, при раке простаты, злокачественных опухолях головного мозга, головы и шеи, злокачественных поражениях костей, метастазах печени. Метод все еще требует усовершенствования. Проведение технических и методических доработок, обеспечивающих его экономическую эффективность, определение обоснованных критериев применения может ускорить его дальнейшее распространение и сужение показаний для использования ПЭТ/КТ. Большинство специалистов ПЭТ/МРТ прогнозируют существенный рост вклада метода в клинические исследования в ближайшие 5–10 лет.

## Литература

1. Assessment of metastatic colorectal cancer with hybrid imaging: comparison of reading performance using different combinations of anatomical and functional imaging techniques in PET/MRI and PET/CT in a short case series / C. Brendle, N.F. Schwenger, H. Rempp [et al.] // *Eur. J. Nucl. Med. Mol. Imaging*. – 2016. – Vol. 43. – P. 123-132.
2. Beyer T. Variation in clinical PET/CT operations: results of an international survey of active PET/CT users / T. Beyer, J. Czernin, L.S. Freudenberg [et al.] // *J. Nucl. Med.* – 2011. – Vol. 52. – P. 303-310.
3. Boelaard R. Current image acquisition option in PET/MRT / R. Boelaard, H.H. Quick // *Semin. Nucl. Med.* – 2015. – Vol. 45. – P. 192-200.
4. Boss A. Future image acquisition trends for PET/MRI / A. Boss, M. Weiger, F. Wiesinger // *Semin. Nucl. Med.* – 2015. – Vol. 45. – P. 201-211.
5. BrainPET: first human tomograph for simultaneous (functional) PET and MR imaging / M. Schmand, Z. Burbar, J. Corbeil [et al.] // *J. Nucl. Med.* – 2007. – Vol. 48, suppl. 2. – P. 45P.

6. Clinical impact of PET/MR imaging in patients with cancer undergoing same-day PET/CT: initial experience in 134 patients – a hypothesis-generating exploratory study / O. A. Catalano, B. R. Rosen, D. V. Sahani // *Radiology*. – 2013. – Vol. 269. – P. 857-869.
7. Clinical research review of scheduled vs, completed PET/MRT scans / D. Holley, H. Gandhi, G. Zaharchuk [et al.] // *J. Nucl. Med.* – 2016. – Vol. 57, suppl. 2. – P. 2710.
8. Combined PET/MR: multi-modality multi-parametric imaging is here – summary report of the 4-th International Workshop on PET/MR imaging: February 23–27, 2015, Tubingen, Germany / D. L. Bailey, B. J. Pichler, B. Guckel [et al.] // *Mol. Imaging Biol.* – 2015. – Vol. 17. – P. 595-608.
9. Combined PET/MR: the real work has just started – summary report of the Third International Workshop on PET/MR imaging: February 17–21, 2014, Tubingen, Germany / D. L. Bailey, G. Antoch, P. Bartenstein [et al.] // *Mol. Imaging Biol.* – 2015. – Vol. 17. – P. 297-312.
10. Combined PET/MRI: a technology becomes mature. / H. F. Wehrl, A. W. Sauter, M. R. Divine [et al.] // *J. Nucl. Med.* – 2015. – Vol. 56. – P. 165-168.
11. Comparative performance of <sup>18</sup>F-FDG PET/MRI and <sup>18</sup>F-FDG PET/CT in detection and characterization of pulmonary lesions in 121 oncologic patients / L. M. Sawicki, J. Grueneisen, C. Buchbender [et al.] // *J. Nucl. Med.* – 2016. – Vol. 57. – P. 582-586.
12. Comparison of hybrid <sup>68</sup>Ga-PSMA PET/MRI and <sup>68</sup>Ga-PSMA PET/CT in the evaluation of lymph node and bone metastases of prostate cancer / M. T. Freitag, J. P. Radtke, B. A. Hadaschik [et al.] // *Eur. J. Nucl. Med. Mol. Imaging*. – 2016. – Vol. 43. – P. 70-83.
13. Comparison of hybrid FDG PET/MRI compared with PET/CT in colorectal cancer staging and restaging: a pilot study / R. M. Paspulati, S. Partovi, K. A. Herrmann [et al.] // *Abdom. Imaging*. – 2015. – Vol. 40. – P. 1415-1425.
14. Comparison of PET/CT and PET/MRI hybrid systems using a <sup>68</sup>Ga-labelled PSMA ligand for the diagnosis of recurrent prostate cancer: initial experience / A. Afshar-Oromieh, U. Haberkorn, H. P. Schlemmer [et al.] // *Eur. J. Nucl. Med. Mol. Imaging*. – 2014. – Vol. 41. – P. 887-897.
15. Contrast-enhanced PET/MR imaging versus contrast-enhanced PET/CT in head and neck cancer: how much MR information is needed? / F. P. Kuhn, M. Hullner, C. E. Mader [et al.] // 2014. – Vol. 55. – P. 551-558.

16. Czernin J. Does PET/MR imaging improve cancer assessments? Literature evidence from more than 900 patients / J. Czernin, L. Ta, K. Herrmann // *J. Nucl. Med.* – 2014. – Vol. 55. – P. 59S-62S.
17. Czernin J. Positron emission tomography scanning current and future applications/ J. Czernin, M. E. Phelps // *Annu. Rev. Med.* – 2002. – Vol. 53. – P. 89-112.
18. Czernin J. The potential of PET/MRI imaging in oncology: a commend to a summary report of the first PET/MRI Workshop in Tuebingen in 2012 / J. Czernin, K. Herrmann / *Mol. Imaging Biol.* – 2013. – Vol. 15. – P. 372-373.
19. Depiction and characterization of liver lesions in whole body [<sup>18</sup>F]-FDG PET/MRI / K. Beiderwellen, B. Gomes, C. Buchbender [et al.] // *Eur. J. Radiol.* – 2013. – Vol. 82. – P. e669-e667.
20. Design and performance evaluation of a whole-body Ingenity TF PET-MRI system / H. Zaidi, N. Ojha, M. Morich [et al.] // *Phys. Med. Biol.* – Vol. 56. – P. 3091-3106.
21. Detection rate, location, and size of pulmonary nodules in trimodality PET/CT-MR: comparison of low-dose CT and Dixon-based MR imaging / P. Stolzmann, P. Veit-Haibach, N. Chuck [et al.] // *Invest. Radiol.* – 2013. – Vol. 48. – P. 241-246.
22. Diagnostic accuracy of whole-body PET/MRI and whole-body PET/CT for TNM staging in oncology / P. Heusch, F. Nensa, B. Schaarschmidt [et al.] // *Eur. J. Nucl. Med. Mol. Imaging.* – 2015. – Vol. 42. – P. 42-48.
23. Diffusion-weighted imaging as part of hybrid PET/MRT protocols for whole-body cancer staging: does it benefit lesion detection? C. Buchbender, V. Hartung-Knemeyer, K. Beiderwellen [et al.] // *Eur. J. Radiol.* – 2013. – Vol. 82. – P. 877-882.
24. Diffusion-weighted MRI of lymphoma: prognostic utility and implications for PET/MRT? / S. Punwani, S. A. Taylor, Z. Z. Saad [et al.] // *Eur. J. Nucl. Med. Mol. Imaging.* – 2013. – Vol. 40. – P. 373-385.
25. Evaluation of prostate cancer with PET/MRI / L. Lindenberg, M. Ahlman, B. Turkbey [et al.] // *J. Nucl. Med.* – 2016. – Vol. 57. – P. 111S-116S. – DOI: 10.2967/jnumed.115.169763.
26. First clinical experience with integrated whole-body PET/MR: comparison to PET/CT in patients with oncologic diagnosis / A. Drzezga, M. Souvatzoglou, M. Eiber [et al.] // *J. Nucl. Med.* – 2012. – Vol. 55. – P. 845-855.
27. Performance of whole-body integrated 18F-FDG PET/MR in comparison to PET/CT for evaluation of malignant bone lesions / M. Eiber, T. Takei, M. Souvatzoglou [et al.] // *J. Nucl. Med.* – 2014. – Vol. 55. – P. 191-197.
28. PET/MR imaging in the detection and characterization of pulmonary lesions: technical and diagnostic evaluation in comparison to PET/CT / I. Rauscher, M. Eiber, S. Furst [et al.] // *J. Nucl. Med.* – 2014. – Vol. 55. – P. 724-729.
29. Pichler B.J. PET/MRI hybrid imaging: devises and initial results / B.J. Pichler, M.S. Judenhofer, H.F. Wehrl [et al.] // *Eur. Radiol.* – 2008. – Vol. 18, N 6. – P. 1077-1086.
30. Positron emission tomography / magnetic resonance imaging for local tumor staging in patients with primary breast cancer: a comparison with positron emission tomography/computed tomography and magnetic resonance imaging / J. Grueneisen, J. Nagarajah, C. Buchbender [et al.] // *Invest. Radiol.* – 2015. – Vol. 50. – P. 505-513.
31. Positron emission tomography/magnetic resonance imaging: the next generation of multimodality imaging / B. J. Pichler, H. F. Wehrl, A. Kolb [et al.] // *Semin. Nucl. Med.* – 2008. – Vol. 38, N 3. – P. 199-208.
32. Potential pediatric application of PET/MR / S. Purz, O. Sabri, A. Vierweger [et al.] // *J. Nucl. Med.* – 2014. – Vol. 55. – P. 32S-39S.
33. Protocol requirements and diagnostic value of PET/MR imaging for liver metastasis detection / C. S. Reiner, P. Stolzmann, L. Husmann [et al.] // *Eur. J. Nucl. Med. Mol. Imaging.* – 2014. – Vol. 41. – P. 649-658.
34. Pulmonary nodules in patients with primary malignancy: comparison of hybrid PET/MR and PET/CT imaging / H. Chandarana, L. Heacock, R. Rakheja [et al.] // *Radiology.* – 2013. – Vol. 268. – P. 874-881.
35. Qualitative and quantitative comparison of PET/CT and PET/MR imaging in clinical practice / K. Z. Al-Nabhani, R. Syed, S. Michopoulou [et al.] // *J. Nucl. Med.* – 2014. – Vol. 55. – P. 88-94.
36. Queiroz M.A. PET/MR in cancers of the head and neck / M. A. Queiroz, M. W. Huellner // *Semin. Nucl. Med.* – 2015. – Vol. 45. – P. 248-265.
37. Ratib O. Whole-body hybrid PET/MRI: ready for clinical use? / O. Ratib, T. Beyer // *Eur. J. Nucl. Med. Mol. Imaging.* – 2011. – Vol. 38. – P. 992-995.
38. Simultaneous in vivo positron emission tomography and magnetic resonance imaging / C. Catana, D. Prociassi, Y. Wu [et al.] // *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.* – 2008. – Vol. 105, N 10. – P. 3705-3710.
39. Simultaneous PET and MR imaging / Y. Shao, S. R. Cherry, K. Farahani [et al.] // *Phys. Med. Biol.* – 1997. – Vol. 42. – P. 1965-1970.
40. Simultaneous PET-MRI: a new approach for functional and morphological imaging / M. S. Ju-



denhofer, H. F. Wehrl, D. F. Newport [et al.] // Nat. Med. – 2008. – Vol. 14. – P. 459-465.

41. Simultaneous whole-body PET/MR imaging in comparison to PET/CT in pediatric oncology: initial results / J. F. Schafer, S. Gatidis, H. Schmidt [et al.] // Radiology. – 2014. – Vol. 273. – P. 230-231.

42. Spick C. F-FDG PET/CT and PET/MRI perform equally well in cancer: evidence from studies on more than 2 300 patients / C. Spick, K. Herrmann, J. Czernin // J. Nucl. Med. – 2016. – Vol. 199, N 3. – P. 420-430.

43. The SMART scanner: A combined PET/CT tomograph for clinical oncology / D. W. Townsend, T. Beyer, P. E. Kinahan [et al.] // Radiology. – 1998. – Vol. 209P. – P.169-170.

44. Tissue classification as a potential approach for attenuation correction in whole-body PET/MRI: evaluation with PET/CT data / A. Martinez-Moller, M. Souvatzoglou, G. Delso [et al.] // J. Nucl. Med. – 2009. – Vol. 50. – P. 520-526.

45. Use of diffusion-weighted imaging (DWI) in PET/MRI for head and neck cancer evaluation / M. A. Queiroz, M. Hullner, F. Kuhn [et al.] // Eur. J. Nucl. Med. Mol. Imaging. – 2014. – Vol. 41. – P. 2212-2221.

46. Variations in PET/MRI operations: results from an international survey among 39 active sites / W. P. Fendler, J. Czernin, K. Herrmann [et al.] // J. Nucl. Med. – 2016. – Vol. 57, N 12. – P. 2016-2021.

47. Werner M.K. MR/PET: A new challenge in hybrid imaging / M. K. Werner, H. Schmidt, N. F. Schwenger // AJR. – 2012. – Vol. 199. – P. 272-277.

48. Whole-body nonenhanced PET/MR versus PET/CT in the staging and restaging of cancer: preliminary observations / M. W. Huellner, P. Appenzeller, F. P. Kuhn [et al.] // Radiology. – 2014. – Vol. 273. – P. 859-869.

### ГИБРИДНЫЕ СИСТЕМЫ ПЭТ/МРТ В ОНКОЛОГИИ: НАСТОЯЩЕЕ И БУДУЩЕЕ

*Д.А. Джужа*

В обзоре рассмотрены основные вопросы развития и применения гибридных систем ПЭТ/МРТ в современной лучевой диагностике. Показано, что основной областью применения ПЭТ/МРТ в настоящее время является онкология. Метод может быть использован при большинстве злокачественных опухолей и обладает диагностическими преимуществами, прежде всего, при раке простаты, злокачественных опухолях головного мозга, головы и шеи, злокачественных по-

ражениях костей, метастазах печени. Несмотря на необходимость дальнейшего усовершенствования ПЭТ/МРТ, прогнозируется существенный рост применения модальности в клинических исследованиях в ближайшие 5-10 лет.

**Ключевые слова:** Гибридные диагностические системы, позитронная эмиссионная томография, магниторезонансная томография, гибридные системы, <sup>18</sup>F-фтордезоксиглюкоза.

### ГІБРИДНІ СИСТЕМИ ПЕТ/МРТ В ОНКОЛОГІЇ: СЬОГОДЕННЯ І МАЙБУТНЄ

*Д.О. Джужа*

В огляді розглянуті основні питання розвитку та застосування гібридних систем ПЕТ/МРТ у сучасній променевої діагностиці. Показано, що основною областю застосування ПЕТ/МРТ в теперішній час є онкологія. Метод може бути застосований при більшості злоякісних пухлин і має діагностичні переваги насамперед у хворих на рак передміхурової залози, злоякісних пухлинах головного мозку, голови та шиї, злоякісних ураженнях кісток, печінки. Не дивлячись на необхідність подальшого удосконалення, прогнозується суттєве збільшення застосування модальності у клінічних дослідженнях в найближчі 5-10 років.

**Ключові слова:** Гібридні діагностичні системи, позитронна емісійна томографія, магнітно-резонансна томографія, <sup>18</sup>F-фтордезоксиглюкоза.

### HYBRID SYSTEM PET/MRI IN ONCOLOGY: THE PRESENT AND FUTURE

*D.A. Dzhuzha*

The main question of development and using of the hybrid system PET/MRI in modern radiological diagnostics was reviewed. It was showed that the main application of hybrid system PET/MRI is oncology. The modality could be used for the diagnostics of the majority of types of cancer, at first for detection of prostate cancer, brain, bone and liver malignancies, head and neck cancer. Despite the necessity of further improvement, the significant increasing of using of PET/MRI at clinical investigation in the nearest 5-10 years was predicated.

**Key words:** Hybrid diagnostic system, positron emission tomography, magnetic resonance imaging, <sup>18</sup>F-fluorodeoxyglucose.