

Возможности применения магнитно-резонансной томографии и позитронно-эмиссионной томографии с ^{18}F -фтордезоксиглюкозой для диагностики рака молочной железы (обзор литературы и собственные клинические наблюдения)

П. Б. Гележе*,^{1,2}, С. П. Морозов¹

¹ ГБУЗ «Научно-практический центр медицинской радиологии Департамента здравоохранения города Москвы», Москва

² Акционерное общество «Европейский медицинский центр», Москва

Magnetic Resonance Imaging and Positron-Emission Tomography with ^{18}F -Fluorodeoxyglucose Application for Breast Cancer Diagnosis (Literature Review with Case Reports)

P. B. Gelezhe*,^{1,2}, S. P. Morozov¹

¹ Radiology Research and Practical Centre, Moscow

² European Medical Center, Moscow

Реферат

Рак молочной железы является социально значимой медицинской проблемой во всем мире. Назначение оптимального плана лечения требует точного стадирования. Магнитно-резонансная томография (МРТ) и позитронно-эмиссионная томография (ПЭТ) достигли значительного прогресса в последние десятилетия, являясь клинически значимыми для различных стадий онкологического процесса. МРТ молочных желез обеспечивает высокую диагностическую точность для оценки местного распространения опухолевого процесса, МРТ всего тела с протоколом ДВИ позволяет выявить отдаленные метастазы. С другой стороны, ПЭТ с ^{18}F -ФДГ, совмещенная с компьютерной томографией (КТ), также обладает высокими диагностическими качествами в обнаружении отдаленных метастазов. ПЭТ/МРТ является быстро развивающейся технологией, применение которой оправдано при необходимости одновременного получения данных о локальном статусе опухоли и ее метаболической активности. Тем не менее в настоящее время требуется больше клинических данных для демонстрации

* **Гележе Павел Борисович**, врач-рентгенолог, радиолог АО «Европейский медицинский центр», научный сотрудник ГБУЗ «Научно-практический центр медицинской радиологии Департамента здравоохранения города Москвы». Адрес: 109029, г. Москва, Средняя Калитниковская ул., д. 28, стр. 1. Тел.: +7 (926) 358-36-99. Электронная почта: gelezhe.pavel@gmail.com

Gelezhe Pavel Borisovich, Radiologist and Nuclear Medicine Physician «European Medical Center», fellow of Radiology Research and Practical Centre. Address: 28-1, ul. Srednyaya Kalitnikovskaya, Moscow, 109029, Russia. Phone number: +7 (926) 358-36-99. E-mail: gelezhe.pavel@gmail.com

преимущества одновременного сбора данных. Продолжается оптимизация протоколов ПЭТ/МРТ, которая позволит повысить диагностическую точность при раке молочной железы. Данный обзор посвящен текущему состоянию вопроса применения МРТ и ПЭТ с ^{18}F -ФДГ в диагностике рака молочной железы, путям развития методов и потенциальным областям применения в будущем.

Ключевые слова: рак молочной железы, магнитно-резонансная томография молочных желез, позитронно-эмиссионная томография, совмещенная с компьютерной томографией, ^{18}F -фтордезоксиглюкоза, позитронно-эмиссионная томография, совмещенная с магнитно-резонансной томографией.

Abstract

Breast cancer is a socially significant medical problem all over the world. Optimal treatment plan requires precise staging. Magnetic resonance imaging (MRI) and positron emission tomography (PET) have made significant progress in recent decades, being clinically significant for various stages of the oncological process. MRI of the breast provides high diagnostic accuracy for local tumor evaluation. Whole-body DWI allows to identify distant metastases. On the other hand, PET with ^{18}F -FDG, combined with computed tomography (CT), also has high diagnostic properties in the detection of distant metastases. PET/MRI is a rapidly developing technology, the use of which is justified when it is necessary to simultaneously obtain data on the local status of the tumor and its metabolic activity. However, more clinical data is now required to demonstrate the benefits of simultaneous data collection. The optimization of the PET/MRI protocols in breast cancer continues, which will increase the diagnostic accuracy. This review focuses on the current state of art in the field of using MRI and ^{18}F -FDG PET in the diagnosis of breast cancer, ways to develop the method and potential applications in the future.

Key words: Breast Cancer, Breast Magnetic Resonance Imaging, Positron-Emission Tomography, Combined with Computer Tomography, ^{18}F -fluorodeoxyglucose, Positron-Emission Tomography, Combined with Magnetic Resonance Imaging.

Актуальность

Рак молочной железы является лидирующей причиной онкологической смертности у женщин по всему миру, при этом на момент постановки диагноза у 4–6 % пациенток уже есть отдаленные метастазы. Относительная 5-летняя выживаемость при IV стадии заболевания составляет 21 %. Международные рекомендации, касающиеся диагностического алгоритма рака молочной железы, регулярно пересматриваются, однако возможности методов лучевой диагностики могут значительно отличаться в зависимости от страны. Также может представлять сложность подбор точного и экономически эффективного метода диагностики в различные фазы онкологического процесса. ПЭТ/МРТ является перспективным методом гибридной

визуализации, который появился относительно недавно. В настоящее время требуется проведение дополнительных клинических исследований с большим количеством испытуемых для оценки клинической значимости ПЭТ/МРТ в диагностике рака молочной железы.

Цель: обзор существующих клинических исследований роли МРТ, ПЭТ/КТ с ^{18}F -ФДГ и ПЭТ/МРТ с ^{18}F -ФДГ в оценке местного стадирования и отдаленного распространения рака молочной железы.

МРТ молочных желез

Скрининг

Возможность применения МРТ для скрининга рака молочной железы исследуется до сих пор. Мировые рекоменда-

ции свидетельствуют о пользе применения МРТ молочных желез в качестве скрининга у носителей мутаций BRCA1 и BRCA2; консенсуса относительно использования в общей популяции не существует [14] (2013).

Предоперационная МРТ молочных желез

В соответствии с рекомендациями EUSOMA показаниями к предоперационной МРТ молочных желез является установленный диагноз инвазивного долькового рака, рак молочной железы у пациента высокого риска, возможность выполнения резекции молочной железы с последующей лучевой терапией. Потенциальная польза от выполнения предоперационной МРТ также ожидается у женщин с очень плотной тканью молочной железы по данным маммографии [16] (2014).

МРТ молочных желез в диагностике местного рецидива и оценке ответа на неоадьювантную терапию

Доказана польза МРТ при оценке объема остаточной опухоли после проведения неоадьювантной терапии [15] (2013). Чувствительность МРТ в отношении рецидива рака молочной железы у женщин, прошедших мастэктомию, резекцию молочной железы, лучевую терапию, достигает 75–100 %. Отрицательная прогностическая ценность МРТ молочных желез выше; при обнаружении находки, подозрительной в отношении рецидива, рекомендуется дальнейшее обследование.

МРТ также может быть применена в качестве дополнительного инструмента при скрытых опухолях, когда диагноз рака молочной железы установлен на основании биопсии подмышечного лимфатического узла или наличия отдален-

ного метастатического поражения, однако при помощи традиционных методов диагностики (маммография, УЗИ) первичная опухоль не выявлена [13] (2014).

Позитронно-эмиссионная томография в диагностике рака молочной железы

Несмотря на наличие опытов по применению различного типа радиофармпрепаратов для выявления и характеристики рака молочной железы, таких, как агонисты HER2-рецепторов, ^{11}C -холин, ^{18}F -холин, ^{11}C -метионин, ^{18}F -NaF, наибольшее распространение на территории Российской Федерации получил метаболический радиофармпрепарат ^{18}F -фтордезоксиглюкоза (^{18}F -ФДГ).

Увеличение метаболической активности ассоциируется с повышением поглощения глюкозы на фоне активности гексокиназы, что наблюдается на примере злокачественных клеток. ^{18}F -ФДГ транспортируется через мембрану и фосфорилируется, однако, в отличие от физиологического аналога, не участвует в дальнейшем метаболизме и накапливается в клетке. Сродство ^{18}F -ФДГ к опухоли зависит от нескольких клинико-патологических критериев. Хорошо известно, что высокодифференцированные опухоли, такие, как инвазивный дольковый рак и протоковый рак *in situ*, демонстрируют меньший метаболизм по сравнению с инвазивным протоковым раком. Уровень поглощения ^{18}F -ФДГ также связан со степенью злокачественности опухоли, пролиферативным индексом Ki-67 и прогностическими факторами первичного рака молочной железы. Существуют доказательства, что трижды негативный рак молочной железы демонстрирует значительное повышение фиксации РФП, однако в прочих случаях наличие ассоциации

между рецепторным статусом опухоли и уровнем метаболизма не показано.

Применение ПЭТ/КТ с ^{18}F -ФДГ в диагностике рака молочной железы **Скрининг**

ПЭТ/КТ всего тела не показана для скрининга рака молочной железы, основными модальностями остаются маммография и УЗИ [8] (2014). В случае, если опухоль обнаруживается при осмотре, УЗИ или МРТ могут быть рекомендованы для уточняющей диагностики и поиска дополнительных очагов.

Ограничения ПЭТ/КТ с ^{18}F -ФДГ связаны в первую очередь с низкой чувствительностью в отношении опухолей диаметром менее 1 см, что объясняется эффектом объемного усреднения. Также возможны ложноотрицательные результаты ПЭТ/КТ при некоторых типах опухолей, таких, как инвазивный дольковый рак или протоковая карцинома *in situ*. Тем не менее наиболее распространенный инвазивный протоковый рак демонстрирует гиперметаболизм. Положительное прогностическое значение ПЭТ/КТ с ^{18}F -ФДГ при раке молочной железы достигает 99,6 %. При некоторых доброкачественных процессах, таких, как жировой некроз, воспалительные гранулемы, фиброаденомы, лактация, возможны ложноположительные результаты.

Первичное стадирование

ПЭТ/КТ всего тела с ^{18}F -ФДГ является высокоспецифичным методом, позволяющим диагностировать метастатическое поражение региональных лимфатических узлов и наличие отдаленных метастазов. Уровень поглощения ^{18}F -ФДГ в большой степени коррелирует со степенью злокачественности опухоли и прогностическими факторами.

Оценка вовлечения регионарных лимфатических узлов

Современные рекомендации не поддерживают применение ПЭТ/КТ с ^{18}F -ФДГ для оценки вовлечения подмышечных лимфатических узлов при первичном раке молочной железы, за исключением особых клинических ситуаций, таких, как пациенты высокого риска с первичной опухолью размером больше 2 см. Малое пространственное разрешение ПЭТ/КТ не позволяет достоверно оценить уровень метаболизма в очагах размером менее 7 мм [3] (2014). Таким образом, биопсия сторожевого лимфатического узла должна быть выполнена даже при негативных результатах ПЭТ.

Специфичность ПЭТ/КТ достаточно высока [7] (2012), и наличие гиперметаболизма подмышечных лимфатических узлов коррелирует с худшим прогнозом и снижением безрецидивной выживаемости. Подключичные, надключичные, внутренние маммарные лимфатические узлы также могут оцениваться по данным ПЭТ/КТ; выявление метастатического поражения влияет на стадию, прогноз и план лечения.

Оценка отдаленного метастазирования

В исследовании под руководством Garami et al. [7] (2012) проведение ПЭТ с ^{18}F -ФДГ позволило изменить стадию у 47 % из 115 пациентов с первичными опухолями молочных желез размером менее 4 см.

Обновление рекомендаций NCCN по диагностике рака молочной железы указывает на применение ПЭТ/КТ с ^{18}F -ФДГ, начиная с клинической стадии IIIA (T3, N1, M0), а также в ситуациях, когда прочие виды визуализации имеют сомнительные результаты. Также рекомендуется дополнять традиционные

методы диагностики (КТ, МРТ, остеосцинтиграфию) ПЭТ/КТ с ^{18}F -ФДГ в случае, если 4 или более подмышечных лимфатических узла поражены метастатическим процессом по результатам диссекции [8] (2014).

ПЭТ/КТ с ^{18}F -ФДГ не показана для стадирования у пациентов на ранней стадии онкологического процесса (I, II) по причине высокой частоты ложноотрицательных результатов в отношении первичной опухоли, низкой чувствительности в оценке лимфатических узлов, малой вероятности наличия отдаленных метастазов [8] (2014).

Оценка эффективности ответа на лечение

ПЭТ/КТ с ^{18}F -ФДГ широко используется для оценки клинического ответа рака молочной железы на лечение, однако не существует четко установленных сроков выполнения контрольного исследования и достоверных критериев ответа [6] (2012). Существует множество исследований с разнообразными критериями включения пациентов и условиями выполнения ПЭТ/КТ, однако независимо от используемого алгоритма ПЭТ/КТ является перспективной методикой для оценки ответа на терапию [10] (2012).

ПЭТ/МРТ в визуализации рака молочной железы

Визуализация рака молочной железы является областью, в которой применение ПЭТ/МРТ является наиболее перспективным. В настоящее время на рынке представлены как аппараты ПЭТ/МРТ с последовательным, так и с одновременным сбором данных.

Оптимизированные протоколы исследования дают преимущество за счет одновременного использования диагно-

стических возможностей обеих модальностей, сокращения времени обследования пациентов, которым требуется проведение ПЭТ/КТ и МРТ, снижения лучевой нагрузки по сравнению с ПЭТ/КТ. Кроме того, некоторые исследования демонстрируют дополнительные преимущества ПЭТ/МРТ. Pace et al. [18] (2014), в частности, в своем исследовании показали эквивалентную точность ПЭТ/КТ и ПЭТ/МРТ в обнаружении очагов; значения SUV и метаболический объем опухоли коррелировали между собой. Интерпретация изображений ПЭТ и МРТ, собранных одновременно, повышает точность диагностики рака молочной железы [21] (2014).

Первичное стадирование

В то время как ПЭТ/КТ не рекомендуется для локального стадирования рака молочной железы по причине ограниченной контрастности КТ-компонента, МРТ играет важную роль в дифференциальной диагностике доброкачественных и злокачественных объемных образований. Эти данные могут значимо изменить хирургическую тактику у некоторых групп пациентов, таких, как молодые женщины, пациентки с плотной тканью молочных желез, а также в случае высокой вероятности мультифокального роста опухоли. МРТ обеспечивает контрастное изображение мягкотканых структур, дополняемое информацией о метаболической активности опухоли (рис. 1).

Исследование, проведенное Mou et al. [17] (2010), замечательно продемонстрировало дополнительные возможности, получаемые при комбинировании модальностей. ПЭТ с ^{18}F -ФДГ и МРТ выполнялись на отдельных аппаратах, комбинированное изображение фор-

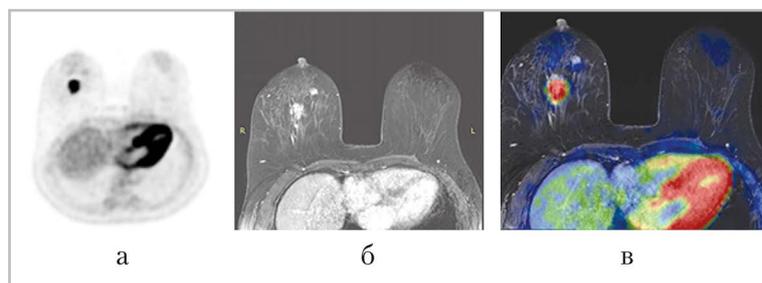


Рис. 1. Гиперметаболическая опухоль правой молочной железы: *а* — ПЭТ с ^{18}F -ФДГ с коррекцией аттенюации на базе МР-изображения, аксиальная реконструкция; *б* — Т1-ВИ с контрастным усилением, аксиальная реконструкция; *в* — совмещенное изображение ПЭТ/МРТ, аксиальная реконструкция

мировалось при помощи специализированного программного обеспечения. В данном исследовании было оценено 90 объемных образований молочных желез. Повышение положительного прогностического значения с 77 % по данным МРТ до 98 % при использовании комбинированных с ПЭТ изображений, увеличение специфичности с 53 до 97 было статистически значимым ($p < 0,05$). Тем не менее чувствительность моноМРТ составила 95 %, моноПЭТ с ^{18}F -ФДГ — 26,7 %, после формирования комбинированных изображений чувствительность метода упала до 9 % [17] (2010). Таким образом, для оценки дополнительного клинического значения комбинации методов требуются дополнительные исследования.

Первый опыт применения специальной 16-канальной катушки для диагностики рака молочной железы при одновременном сборе данных ПЭТ/МРТ (Biograph mMR, Siemens Healthcare, Erlangen, Germany) продемонстрировал многообещающие результаты. Качество МР-изображения соответствовало полученным на аналогичном аппарате моноМРТ, точность оценки ПЭТ-изображения обеспечивалась адекватным формированием карты коррекции

аттенюации при помощи работы 16-канальной катушки для молочных желез [5] (2015).

Комбинация функциональных данных МРТ, таких, как ДВИ и динамические перфузионные карты, с метаболическими показателями ПЭТ могут обеспечить новый уровень оценки опухоли молочных желез. Ограничение диффузии и повышение метаболизма отражают сходные патоморфологические процессы, поэтому количественная оценка показателей SUV и ИКД позволяет дифференцировать доброкачественные от злокачественных опухолей. Уровень SUV опухоли имеет отрицательную корреляцию с прогнозом опухоли [2] (2014).

Оценка регионарного и отдаленного метастазирования

Первичное стадирование рака молочной железы критически важно для планирования лечения и оценки прогноза. Местное стадирование включает точную локализацию объемного образования и оценку контралатеральной молочной железы для выявления потенциально возможного распространения.

Оценка отдаленного распространения заболевания включает выявление

метастазов не только в регионарных лимфатических узлах, но также и в костях, печени, легких, головном мозге.

Оценка регионарных лимфатических узлов

МРТ не считается эффективным в отношении диагностики метастатического поражения лимфатических узлов при предоперационном стадировании рака молочной железы. Подмышечные и внутренние маммарные лимфатические узлы обычно включаются в область сканирования при МРТ молочных желез и при тщательной оценке исследования может быть получена важная информация об их состоянии. Для оценки лимфатических узлов могут быть применены как морфологические данные, так и функциональные показатели, такие, как кривая динамического контрастного усиления и степень ограничения диффузии [9] (2013).

В исследовании, проведенном Taneja et al. [21] (2014), 36 пациентам с гистологически подтвержденным интритрипотоковым раком молочной железы была проведена ПЭТ/МРТ с ^{18}F -ФДГ и МРТ молочных желез. ПЭТ и МРТ продемонстрировали высокую (91 %) специфичность в диагностике подмышечных лимфатических узлов, при этом чувствительность ПЭТ оказалась ниже (60 %), чем у МРТ (93,3 %). Для оценки внутренних маммарных и надключичных лимфатических узлов комбинация функциональных данных МРТ и ПЭТ позволяет добиться более точной диагностики метастатического поражения лимфатических узлов (рис. 2).

^{18}F -ФДГ ПЭТ с коррекцией аттенюации на базе МР-изображения, T1-ВИ с контрастным усилением, совмещенное изображение ПЭТ/МРТ в аксиальных (*a* – *в*) и сагиттальных (*г* – *е*)

реконструкциях. На изображениях *a*, *б*, *в* определяется гиперметаболическая опухоль правой молочной железы; на изображениях *г*, *д*, *е* визуализируется увеличенный правый подмышечный узел с гиперметаболизмом (*красная стрелка*).

Диагностика отдаленных метастазов

Подходы к поиску отдаленных метастазов у пациентов с впервые выявленным раком молочной железы также являются объектами для дискуссий. В то время как показано, что выполнение расширенного исследования всего тела у пациентов, страдающих раком молочной железы I стадии, не влияет на продолжительность и качество жизни, тактика в отношении более продвинутых стадий остается неясной. В частности, для стадии II и выше традиционные модальности, такие, как рентгенография грудной клетки, УЗИ печени и скинтиграфия костей, все чаще заменяются КТ и ПЭТ/КТ.

Импульсные последовательности Dixon могут применяться для коррекции поглощения и анатомической локализации очагов, выявленных при ПЭТ/МРТ всего тела. Дополнительным преимуществом ПЭТ/МРТ является возможность в процессе исследования дифференцировать доброкачественные находки, которые могли быть ложно интерпретированы как подозрительные гиперметаболические очаги по данным ПЭТ с ^{18}F -ФДГ.

Метастазы в печени

В исследовании, опубликованном Reiner et al. [19] (2014), производится сравнение точности ПЭТ/МРТ и ПЭТ/КТ с ^{18}F -ФДГ для выявления метастатического поражения печени.

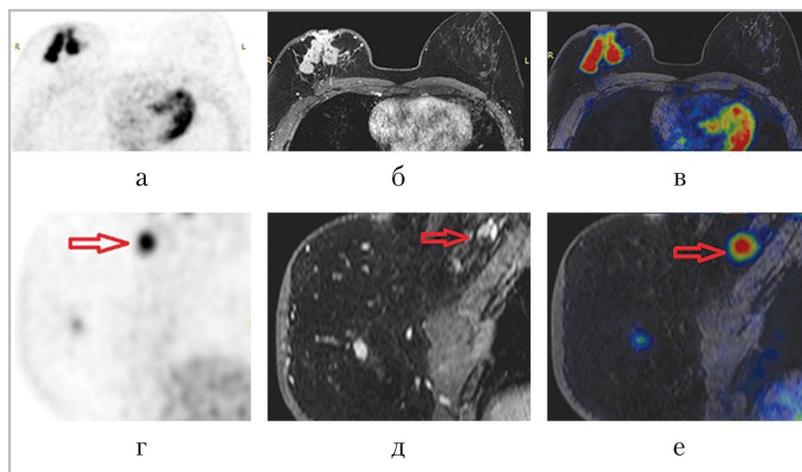


Рис. 2. Опухоль правой молочной железы с подмышечной лимфаденопатией, визуализируемая методом ПЭТ/МРТ с ^{18}F -ФДГ

ПЭТ/МРТ с выполнением традиционных T1-ВИ, T2-ВИ продемонстрировала схожую диагностическую точность с ПЭТ/КТ с внутривенным контрастным усилением. Использование динамического контрастного усиления, диффузионно-взвешенных изображений приводит к значительному повышению диагностической точности МР-изображений. В упомянутой работе рекомендуется использовать контрастное усиление для исключения метастатического поражения печени [19] (2014); однако у пациентов, страдающих раком молочной железы, затруднительно одновременное выполнение контрастного усиления молочных желез и печени.

В статье Taneja et al. [21] (2014), упомянутой ранее, для оценки случайно выявленных метастатических очагов в печени предполагалось использование ДВИ, однако ни у одного из 36 пациентов метастазов в печени выявлено не было.

Метастатическое поражение костей

Существует значительное количество клинических исследований, оценивающих эффективность МРТ всего тела

для выявления метастатического поражения скелета в сравнении с прочими модальностями, в первую очередь остеосцинтиграфией [12] (2015).

В соответствии с результатами данных работ показано, что МРТ всего тела обладает более высокой специфичностью в отношении выявления метастатического поражения скелета (рис. 3). Относительно высокая стоимость МРТ всего тела делает затруднительным его использование в ежедневной клинической практике. МРТ в целом более предпочтительно, нежели КТ, в диагностике метастазов костного мозга. По этой причине выполнение МРТ одновременно с ПЭТ позволит значительно улучшить точность определения метастатического поражения скелета. Сочетанное введение ^{18}F -ФДГ и NaF с последующим ПЭТ/МРТ открывает возможности для оптимального мультипараметрического исследования.

Метастатическое поражение легких

Было показано, что, несмотря на меньшую частоту выявления легочных очагов при помощи МРТ, на уровне паци-

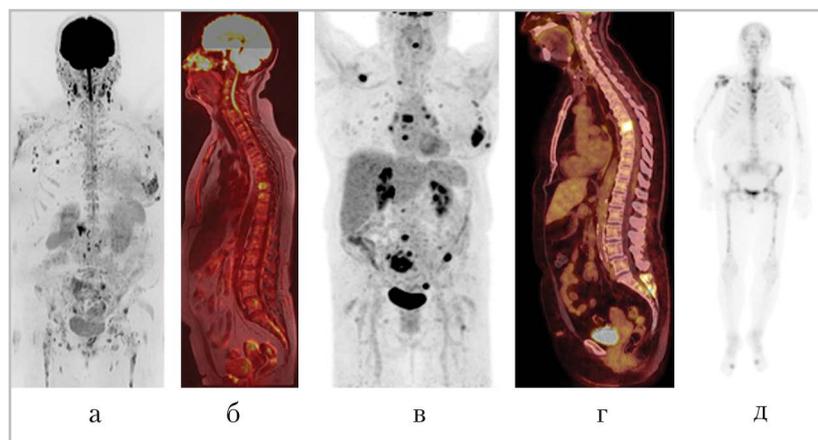


Рис. 3. Множественное метастатическое поражение скелета у пациентки, страдающей опухолью левой молочной железы: *а* — проекция максимальной интенсивности (maximum intensity projection — MIP) диффузионно-взвешенных изображений (ДВИ) всего тела; *б* — совмещенные T1-ВИ и ДВИ в сагиттальной реконструкции; *в* — MIP ПЭТ с ^{18}F -ФДГ; *г* — совмещенные изображения ПЭТ с ^{18}F -ФДГ и КТ; *д* — остеосцинтиграфия скелета с $^{99\text{m}}\text{Tc}$

ентов статистически значимой разницы по сравнению с КТ не выявлено. Чувствительность, специфичность, положительное и отрицательное прогностические значения МРТ для очагов более размером 5 мм приближаются к 100%. Однако получаемые результаты в большей степени зависят от параметров используемых импульсных последовательностей. В работе, опубликованной Arpenzeller et al. [1] (2013), доказано превосходство ПЭТ/КТ над ПЭТ/МРТ в обнаружении легочных очагов, однако единственной импульсной последовательностью для легких была Dixon-based T1-WI 3-dimensional gradient echo sequence, собранная с использованием мягкой катушки для тела.

В исследовании, проведенном Huellner et al. (2014), для выявления и характеристики легочных очагов использовалась специальная T2-взвешенная импульсная последовательность с коррекцией артефактов от движения, благодаря которой была достигнута точность, превышающая КТ [11] (2014). Тем не

менее следует принимать во внимание значительное ограничение визуализации легочных очагов менее 3–4 мм в диаметре, что может значительно повлиять на диагноз [20] (2013). По данным работы Chandarana et al. (2013), МР-данные, полученные при свободном дыхании и одновременном сборе данных ПЭТ, позволяют добиться чувствительности 95,6% в обнаружении очагов размером более 5 мм в диаметре [4] (2013). Однако зачастую КТ легких при ПЭТ/КТ также выполняется без задержки дыхания, что крайне затрудняет интерпретацию мелких легочных очагов и требует дополнительных диагностических КТ. При этом выявление мелкого (до 8 мм) легочного очага не влияет на терапевтическую тактику, так как гистологическая верификация подобных находок невозможна. Единственной возможной рекомендацией является выполнение контрольных КТ-исследований.

Заключение

Сравнение возможностей ПЭТ/КТ и ПЭТ/МРТ затруднительно по причине

того, что протоколы выполнения ПЭТ/МРТ могут значительно варьироваться. Необходимо принимать во внимание, что наличие специфических импульсных последовательностей, таких, как T1-ВИ Dixon, T2-ВИ HASTE TSE, ДВИ, позволяет потенциально достичь более высокой точности диагностики отдаленных метастазов по сравнению с низкодозовой ПЭТ/КТ благодаря превосходной мягкотканной контрастности.

Для паренхимы печени последовательность T1-ВИ Dixon позволяет дифференцировать наиболее часто встречаемые доброкачественные находки, такие, как билиарные кисты и гемангиомы. В то же время МРТ всегда имеет преимущество по сравнению с КТ без контрастного усиления в диагностике патологических изменений центральной нервной системы. Метастатические очаги скелета, как правило, с адекватной точностью визуализируются при ПЭТ с ^{18}F -ФДГ и морфологически подтверждаются данными базовых МР-последовательностей. Даже в диагностике клинически значимых легочных очагов, как отмечалось ранее, МРТ не уступает КТ.

ПЭТ/МРТ в настоящее время остается относительно дорогостоящей и технически сложной методикой, которую не следует выполнять при отсутствии необходимости визуализации отдаленных метастазов в сочетании с локальной оценкой опухоли. Импульсные последовательности ПЭТ/МРТ следует оптимизировать с целью уменьшения общей продолжительности исследования всего тела.

Для обоснования экономической целесообразности применения ПЭТ/МРТ в клинической практике требуются дополнительные исследования.

Список литературы

1. Appenzeller P., Mader C., Huellner M. et al. PET/CT versus body coil PET/MRI: How low can you go? // *Insights Imaging*. 2013. V. 4. № 4. P. 481–490.
2. Baba S., Isoda T., Maruoka Y. et al. Diagnostic and prognostic value of pretreatment SUV in ^{18}F -FDG/PET in breast cancer: comparison with apparent diffusion coefficient from diffusion-weighted MR imaging // *J. Nucl. Med.* 2014. V. 55. № 5. P. 736–742.
3. Bellevre D., Blanc Fournier C., Switers O. et al. Staging the axilla in breast cancer patients with ^{18}F -FDG/PET: How small are the metastases that we can detect with new generation clinical PET systems? // *Eur. J. Nucl. Med. Mol. Imag.* 2014. V. 41. № 6. P. 1103–1112.
4. Chandarana H., Heacock L., Rakheja R. et al. Pulmonary nodules in patients with primary malignancy: Comparison of hybrid PET/MR and PET/CT imaging // *Radiol.* 2013. V. 268. № 3. P. 874–881.
5. Dregely I., Lanz T., Metz S. et al. A 16-channel MR coil for simultaneous PET/MR imaging in breast cancer // *Eur. Radiol.* 2015. № 25. P. 1154–1161.
6. Duch J., Fuster D., Munoz M. et al. PET/CT with [^{18}F]-fluorodeoxyglucose in the assessment of metabolic response to neoadjuvant chemotherapy in locally advanced breast cancer // *Q. J. Nucl. Med. Mol. Imag.* 2012. V. 56. № 3. P. 291–298.
7. Garami Z., Hascsi Z., Varga J. et al. The value of ^{18}F -FDG PET/CT in early-stage breast cancer compared to traditional diagnostic modalities with an emphasis on changes in disease stage designation and treatment plan // *Eur. J. Surg. Oncol.* 2012. V. 38. № 1. P. 31–37.
8. Gradishar W., Anderson B., Blair S. et al. Breast cancer version 3.2014 // *J. Natl.*

- Compr. Canc. Netw. 2014. V. 12. № 4. P. 542–590.
9. *Groheux D., Espie M., Giacchetti S. et al.* Performance of FDG PET/CT in the clinical management of breast cancer // *Radiol.* 2013. V. 266. № 2. P. 388–405.
 10. *He N., Xie C., Wei W. et al.* A new, preoperative, MRI-based scoring system for diagnosing malignant axillary lymph nodes in women evaluated for breast cancer // *Eur. J. Radiol.* 2012. V. 81. № 10. P. 2602–2612.
 11. *Huellner M., Appenzeller P., Kuhn F. et al.* Whole-body nonenhanced PET/MR versus PET/CT in the staging and restaging of cancers: Preliminary observations // *Radiol.* 2014. V. 273. № 3. P. 859–869.
 12. *Jambor I., Kuisma A., Ramadan S. et al.* Prospective evaluation of planar bone scintigraphy, SPECT, SPECT/CT, ¹⁸F-NaF PET/CT and whole body 1,5 T MRI, including DWI, for the detection of bone metastases in high risk breast and prostate cancer patients: SKELETA clinical trial // *Acta Oncol.* 2015. Early Online. P. 1–9.
 13. *Knuttel F., Menezes G., van den Bosch M. et al.* Current clinical indications for magnetic resonance imaging of the breast // *J. Surg. Oncol.* 2014. V. 110. № 1. P. 26–31.
 14. *Mainiero M., Lourenco A., Mahoney M. et al.* ACR appropriateness criteria breast cancer screening // *J. Am. Coll. Radiol.* 2013. V. 10. № 1. P. 11–14.
 15. *Marinovich M., Houssami N., Macaskill P. et al.* Meta-analysis of magnetic resonance imaging in detecting residual breast cancer after neoadjuvant therapy // *J. Natl. Cancer. Inst.* 2013. V. 105. № 5. P. 321–333.
 16. *Menezes G., Knuttel F., Stehouwer B. et al.* Magnetic resonance imaging in breast cancer: A literature review and future perspectives // *World J. Clin. Oncol.* 2014. V. 5. № 2. P. 61–70.
 17. *Moy L., Noz M., Maguire G. Jr. et al.* Role of fusion of prone FDG-PET and magnetic resonance imaging of the breasts in the evaluation of breast cancer // *Breast J.* 2010. V. 16. № 4. P. 369–376.
 18. *Pace L., Nicolai E., Luongo A. et al.* Comparison of whole-body PET/CT and PET/MRI in breast cancer patients: Lesion detection and quantitation of ¹⁸F-deoxyglucose uptake in lesions and in normal organ tissues // *Eur. J. Radiol.* 2014. V. 83. № 2. P. 289–296.
 19. *Reiner C., Stolzmann P., Husmann L. et al.* Protocol requirements and diagnostic value of PET/MR imaging for liver metastasis detection // *Eur. J. Nucl. Med. Mol. Imag.* 2014. V. 41. № 4. P. 649–658.
 20. *Stolzmann P., Veit-Haibach P., Chuck N. et al.* Detection rate, location, and size of pulmonary nodules in trimodality PET/CT-MR: Comparison of low-dose CT and Dixon-based MR imaging // *Invest. Radiol.* 2013. V. 48. № 5. P. 241–246.
 21. *Taneja S., Jena A., Goel R. et al.* Simultaneous whole-body ¹⁸F-FDG PET-MRI in primary staging of breast cancer: A pilot study // *Eur. J. Radiol.* 2014. V. 83. P. 2231–2239.

References

1. *Appenzeller P., Mader C., Huellner M. et al.* PET/CT versus body coil PET/MRI: How low can you go? *Insights Imaging.* 2013. V. 4. No. 4. P. 481–490.
2. *Baba S., Isoda T., Maruoka Y. et al.* Diagnostic and prognostic value of pretreatment SUV in ¹⁸F-FDG/PET in breast cancer: comparison with apparent diffusion coefficient from diffusion-weighted MR imaging. *J. Nucl. Med.* 2014. V. 55. No. 5. P. 736–742.

3. *Belleve D., Blanc Fournier C., Switsters O. et al.* Staging the axilla in breast cancer patients with ¹⁸F-FDG/PET: How small are the metastases that we can detect with new generation clinical PET systems? *Eur. J. Nucl. Med. Mol. Imaging.* 2014. V. 41. No. 6. P. 1103–1112.
4. *Chandarana H., Heacock L., Rakheja R. et al.* Pulmonary nodules in patients with primary malignancy: Comparison of hybrid PET/MR and PET/CT imaging. *Radiology.* 2013. V. 268. No. 3. P. 874–881.
5. *Dregely I., Lanz T., Metz S. et al.* A 16-channel MR coil for simultaneous PET/MR imaging in breast cancer. *Eur. Radiology.* 2015. No. 25. P. 1154–1161.
6. *Duch J., Fuster D., Munoz M. et al.* PET/CT with [¹⁸F]-fluorodeoxyglucose in the assessment of metabolic response to neoadjuvant chemotherapy in locally advanced breast cancer. *Q. J. Nucl. Med. Mol. Imaging.* 2012. V. 56. No. 3. P. 291–298.
7. *Garami Z., Hascsi Z., Varga J. et al.* The value of ¹⁸F-FDG PET/CT in early-stage breast cancer compared to traditional diagnostic modalities with an emphasis on changes in disease stage designation and treatment plan. *Eur. J. Surg. Oncol.* 2012. V. 38. No. 1. P. 31–37.
8. *Gradishar W., Anderson B., Blair S. et al.* Breast cancer version 3.2014. *J. Natl. Compr. Canc. Netw.* 2014. V. 12. No. 4. P. 542–590.
9. *Groheux D., Espie M., Giacchetti S. et al.* Performance of FDG PET/CT in the clinical management of breast cancer. *Radiology.* 2013. V. 266. No. 2. P. 388–405.
10. *He N., Xie C., Wei W. et al.* A new, preoperative, MRI-based scoring system for diagnosing malignant axillary lymph nodes in women evaluated for breast cancer. *Eur. J. Radiol.* 2012. V. 81. No. 10. P. 2602–2612.
11. *Huellner M., Appenzeller P., Kuhn F. et al.* Whole-body nonenhanced PET/MR versus PET/CT in the staging and restaging of cancers: Preliminary observations. *Radiology.* 2014. V. 273. No. 3. P. 859–869.
12. *Jambor I., Kuisma A., Ramadan S. et al.* Prospective evaluation of planar bone scintigraphy, SPECT, SPECT/CT, ¹⁸F-NaF PET/CT and whole body 1,5 T MRI, including DWI, for the detection of bone metastases in high risk breast and prostate cancer patients: SKELETA clinical trial. *Acta Oncologica.* 2015. Early Online. P. 1–9.
13. *Knuttel F., Menezes G., van den Bosch M. et al.* Current clinical indications for magnetic resonance imaging of the breast. *J. Surg. Oncol.* 2014. V. 110. No. 1. P. 26–31.
14. *Mainiero M., Lourenco A., Mahoney M. et al.* ACR appropriateness criteria breast cancer screening. *J. Am. Coll. Radiol.* 2013. V. 10. No. 1. P. 11–14.
15. *Marinovich M., Houssami N., Macaskill P. et al.* Meta-analysis of magnetic resonance imaging in detecting residual breast cancer after neoadjuvant therapy. *J. Natl. Cancer. Inst.* 2013. V. 105. No. 5. P. 321–333.
16. *Menezes G., Knuttel F., Stehouwer B. et al.* Magnetic resonance imaging in breast cancer: A literature review and future perspectives. *World J. Clin. Oncol.* 2014. V. 5. No. 2. P. 61–70.
17. *Moy L., Noz M., Maguire G. Jr. et al.* Role of fusion of prone FDG-PET and magnetic resonance imaging of the breasts in the evaluation of breast cancer. *Breast J.* 2010. V. 16. No. 4. P. 369–376.
18. *Pace L., Nicolai E., Luongo A. et al.* Comparison of whole-body PET/CT and PET/MRI in breast cancer patients: Lesion detection and quantitation of

- ¹⁸F-deoxyglucose uptake in lesions and in normal organ tissues. Eur. J. Radiology. 2014. V. 83. No. 2. P. 289–296.
19. *Reiner C., Stolzmann P., Husmann L. et al.* Protocol requirements and diagnostic value of PET/MR imaging for liver metastasis detection. Eur. J. Nucl. Med. Mol. Imaging. 2014. V. 41. No. 4. P. 649–658.
 20. *Stolzmann P., Veit-Haibach P., Chuck N. et al.* Detection rate, location, and size of pulmonary nodules in trimodality PET/CT-MR: Comparison of low-dose CT and Dixon-based MR imaging. Invest. Radiol. 2013. V. 48. No. 5. P. 241–246.
 21. *Taneja S., Jena A., Goel R. et al.* Simultaneous whole-body ¹⁸F-FDG PET-MRI in primary staging of breast cancer: A pilot study. Eur. J. Radiology. 2014. V. 83. P. 2231–2239.

Сведения об авторах

Гележе Павел Борисович, врач-рентгенолог, радиолог АО «Европейский медицинский центр», научный сотрудник ГБУЗ «Научно-практический центр медицинской радиологии Департамента здравоохранения города Москвы». Адрес: 109029, г. Москва, Средняя Калитниковская ул., д. 28, стр. 1. Тел.: +7 (926) 358-36-99. Электронная почта: gelezhe.pavel@gmail.com

Gelezhe Pavel Borisovich, Radiologist And Nuclear Medicine Physician «European Medical Center», fellow of Radiology Research and Practical Centre. Address: 28-1, ul. Srednyaya Kalitnikovskaya, Moscow, 109029, Russia. Phone number: +79263583699. E-mail: Gelezhe.pavel@gmail.com

Морозов Сергей Павлович, доктор медицинских наук, профессор, руководитель ГБУЗ «Научно-практический центр медицинской радиологии Департамента здравоохранения города Москвы». Адрес: 109029, г. Москва, Средняя Калитниковская ул., д. 28, стр. 1. Тел.: +7 (495) 678-54-95; +7 (495) 671-56-54. Электронная почта: npcmr@zdrav.mos.ru

Morozov Sergey Pavlovich, M. D. Med., Professor, Director, Research and Practical Center of Medical Radiology of Moscow Healthcare Department. Address: 28-1, ul. Srednyaya Kalitnikovskaya, Moscow, 109029, Russia. Phone number: +7 (495) 678-54-95; +7 (495) 671-56-54. E-mail: npcmr@zdrav.mos.ru

Финансирование исследования и конфликт интересов.

Исследование не финансировалось какими-либо источниками. Авторы заявляют, что данная работа, ее тема, предмет и содержание не затрагивают конкурирующих интересов.