

## ПОСЛЕДНИЕ ДОСТИЖЕНИЯ МАГНИТНО-РЕЗОНАНСНОЙ ТОМОГРАФИИ ВСЕГО ТЕЛА В ОНКОЛОГИИ

Субботин Ю.А.<sup>1,2</sup>, Бахтиозин Р.Ф.<sup>2</sup>

**Цель исследования.** В последнее время методика магнитно-резонансной томографии всего тела все более широко используется в онкологической визуализации благодаря таким преимуществам, как получение ценной диагностической информации за относительно короткое время сканирования, отсутствие применения радиоизотопов и внутривенного контрастирования, сравнительно низкая цена в сравнении с традиционными методами ядерной медицины. Целью данного обзора является описание основных направлений использования МРТ всего тела в онкологической практике. Приведены данные зарубежных исследований. МРТ всего тела можно считать многообещающей методикой, позволяющей получать результаты в рамках одного исследования, а также она играет ключевую роль в онкологии, благодаря возможности раннего выявления, стадирования опухоли и оценки проводимого противоопухолевого лечения, в особенности у беременных пациенток и пациентов детского возраста.

**Ключевые слова:** магнитно-резонансная томография всего тела, диффузионно-взвешенные изображения, онкология, метастазы.

Контактный автор: Субботин Ю.А., e-mail: y.subbotin@gmail.com

*Для цитирования:* Субботин Ю.А., Бахтиозин Р.Ф. Последние достижения магнитно-резонансной томографии всего тела в онкологии. REJR 2018; 8(3):74-82. DOI:10.21569/2222-7415-2018-8-3-74-82.

Статья получена: 03.09.18

Статья принята: 17.09.18

## RECENT UPDATES ON WHOLE-BODY MRI IN ONCOLOGY

Subbotin Y.A.<sup>1,2</sup>, Bakhtiozin R.F.<sup>2</sup>

**Purpose.** In recent years, whole-body MRI have been increasingly used in the field of oncological radiology owing to its advantages such as: yield of high-quality diagnostic information in relatively short scan time, lack of radioisotope or intravenous contrast use, and comparably low examination cost in contrast to traditional nuclear medicine techniques. Aim of this article is to bring the overview of whole-body MRI as a technique and current applications of its use in oncological radiology.

**Keyword:** whole-body MRI, diffusion-weighted imaging, oncology, metastases.

Corresponding author: Subbotin Y.A., e-mail: y.subbotin@gmail.com

*For citation:* Subbotin Y.A., Bakhtiozin R.F. Recent updates on whole-body MRI in oncology. REJR 2018; 8 (3):74-82. DOI:10.21569/2222-7415-2018-8-3-74-82.

Received: 03.09.18

Accepted: 17.09.18

**М** агнитно-резонансная томография давно вошла в арсенал лучевых методов исследования в первичной диагностике, стадировании и динамическом наблюдении онкологи-

ческих больных. Более 20 лет МРТ позволяет диагностировать первичные и вторичные новообразования, оценивать их распространенность и ответ на проводимое лечение. Относительно недавно, благодаря техническим усовершен-

1- Moscow municipal oncologic hospital №62.  
2- I.M. Sechenov First Moscow State Medical University (Sechenov University).  
Moscow, Russia.

ствованиям, в дополнение к оценке анатомических структур стали доступны новые последовательности, позволяющие с большой точностью предоставить функциональную информацию о физиологии опухоли, включая метаболизм (спектроскопия), ангиогенез (перфузия), клеточную плотность (диффузия) и степень оксигенации крови (BOLD) [1].

В настоящее время большинство МР-исследований ограничивается одной областью сканирования с частым использованием контрастных средств, содержащих гадолиний. Системное стадирование всегда было проблематично, вследствие отсутствия подходящего оборудования и программного обеспечения, что в свою очередь вело к длительным исследованиям и низкому качеству полученных изображений при сравнении с традиционными методиками ядерной медицины и компьютерной томографии.

Однако в последние годы многие технические достижения позволяют получать изображения всего тела с хорошим пространственным и временным разрешением.

В 1999 году Eustace et al. опубликовали одну из первых статей о возможностях МРТ всего тела [2]. С тех пор вышло большое количество публикаций о применении методики в различных специальностях таких, как педиатрия, ревматология, гинекология и онкология [2 - 4]. Так, в статье Schaefer JF в 2006 году был сделан акцент на использование методики при стадировании и раннем выявлении злокачественных новообразований у «бессимптомных» пациентов [5].

Кроме того, из-за важной роли в диагностических алгоритмах обследования онкологических пациентов, отдельные статьи сравнивают диагностические показатели МРТ всего тела с методами ядерной медицины (ПЭТ/КТ с  $^{18}\text{F}$ -ФДГ и  $^{68}\text{Ga}$ , а также остеосцинтиграфией) [6 - 8].

Сравнение методик привело к обнадеживающим результатам и указало на их взаимодополняемость. Таким образом, МРТ всего тела дает дополнительную диагностическую и прогностическую информацию, может быть использована как средство скрининга специфических групп пациентов и является новым биомаркером ответа на проводимое противоопухолевое лечение [8]. Целью данного обзора является описание основных направлений использования МРТ всего тела в специализированном онкологическом учреждении.

#### **Физические принципы МРТ всего тела.**

Одной из важнейших последовательностей в протоколе сканирования МРТ всего тела является функциональная DWIBS (диффузионно-взвешенная визуализация с подавлением

сигнала от фоновых тканей) [9]. Диффузионно-взвешенные изображения (ДВИ) отображают методику определения движения внутриклеточных молекул воды в тканях и органах. ДВИ позволяют визуализировать и измерять постоянное движение молекул воды и ее скорость, зависящую от кинетической энергии данных молекул. Существует множество факторов, ограничивающих движение молекул воды, таких, как клеточный состав ткани, количество молекул воды во внеклеточном пространстве, вязкость среды, содержание белковых молекул. Все вышеперечисленные факторы приводят к повышенному сигналу на диффузионно-взвешенных изображениях. Благодаря высокому контрасту изображений на ДВИ, за счет высокого сигнала участков ограничения диффузии и подавленного МР-сигнала от окружающих тканей, становится возможным выявление патологических образований [10]. Однако не стоит забывать, что и в неизмененных тканях может происходить ограничение диффузии (например, лимфатические узлы, надпочечники, селезенка). Также абсцессы, благодаря структуре своего содержимого, имеют признаки патологического ограничения диффузии, что может иногда приводить к ложноположительным результатам при поиске злокачественных образований. Так, например, при оценке постоперационных изменений после резекции прямой кишки по поводу злокачественного образования, участки ограничения диффузии на изотропных ДВИ и ИКД-карте (исчисляемый коэффициент диффузии) должны быть дифференцированы между рецидивом образования и сформировавшимся абсцессом.

Наиболее часто используемый протокол обычно состоит из анатомических последовательностей таких, как T1-взвешенные изображения и STIR (последовательность инверсия-восстановление с коротким временем инверсии), функциональная последовательность DWI (диффузионно-взвешенные изображения). T1-ВИ позволяют детально визуализировать анатомические структуры, в то время как последовательность STIR является методом выбора при получении T2-ВИ с оптимальным подавлением сигнала от жировой ткани, несмотря на неоднородность магнитного поля. МРТ всего тела также позволяет слияние анатомических и диффузионно-взвешенных изображений, тем самым повышая показатели чувствительности при оценке образований. На изображениях с высоким значением b фактора происходит подавление сигнала от фоновых тканей, таким образом затрудняя оценку анатомических структур. Поэтому слияние функциональных (ДВИ или ИКД-карта) и анатомических изображений, которое может быть воспроизведено посредством специального программного обеспе-

чения, позволяет проводить выявление образований и их дифференциальную диагностику [11].

МРТ всего тела более предпочтительно проводить на томографах с напряженностью магнитного поля 1,5 Тл. Несмотря на то, что отношение сигнал/шум в магнитно-резонансных томографах 3 Тл больше в два раза, отмечается более выраженное искажение получаемых изображений вследствие большей неоднородности магнитного поля. Однако 3 Тл томографы, оборудованные мультипередатчиками катушками, могут предотвращать появление диэлектрических эффектов благодаря применению модулированных амплитудных/фазовых импульсов. В дополнение к этому, нет существенных различий отношения контраст/шум у томографов 1,5 Тл и 3 Тл, так как интенсивность МР-сигнала T2-ВИ тканей незначительно зависит от напряженности магнитного поля.

Современные МР-томографы оборудованы градиентными катушками с высокой пиковой амплитудой (min. значения 45 мТ/м) и более высокой скоростью нарастания градиента (200 мТ/м/сек), благодаря которым достигается лучшее соотношение сигнал/шум из-за более широкого диапазона частот и меньшего времени повторения время/эхо. Множественные усреднения, установленные индивидуально для каждого значения b, также, как более короткие считывания для заполнения k-пространства, делают дыхательные и сердечные двигательные артефакты незначительными, таким образом, не требующими синхронизации.

В идеале необходимо избегать методик спектрального насыщения для подавления сигнала от жировой ткани в ДВИ таких, как SPIR (спектральная пресатурация инверсия-восстановление) или SPAIR (спектрально-ослабленная инверсия-восстановление). При этом следует использовать методику STIR благодаря её меньшей чувствительности к неоднородности поля.

Изображения тела могут быть получены в коронарной плоскости с 4 зонами сканирования с использованием катушек от головы до малого таза. При получении аксиальных ДВИ возникает меньше артефактов искажения от вихревых токов. Однако такое сканирование требует большее количество зон сканирования, что приводит к увеличению времени сканирования [8].

Значения градиентов диффузии (b фактор) должны определяться целью исследования того или иного органа. Так для оценки печени лучше использовать значения B50 и B600 с/мм<sup>2</sup>, для выявления костных метастазов до B1000 с/мм<sup>2</sup>. Методики с использованием множественных b факторов позволяют проводить более точное измерение ИКД, но увеличивают

общее время исследования [6, 12].

#### **МРТ всего тела: области применения. Лимфома.**

В настоящее время <sup>18</sup>F-ФДГ ПЭТ/КТ рекомендована как высокочувствительный метод для стадирования и оценки ответа на терапию при ПЭТ-позитивных лимфомах [13]. Некоторые исследования, которые сравнивают <sup>18</sup>F-ФДГ ПЭТ/КТ и МРТ всего тела показали многообещающие результаты [14, 15]. Ограничение диффузии молекул воды происходит вследствие повышенной клеточности, прежде всего в определенных гистологических подтипах [16]. МРТ всего тела также позволяет определять опухолевую нагрузку и играет важную роль в оценке прогноза. Исследование Van Ufford показало совпадение 77% результатов МРТ всего тела и <sup>18</sup>F-ФДГ ПЭТ/КТ при стадировании первично выявленных лимфом, согласно классификации Ann Arbor [14]. Несколько случаев были диагностированы с более высокой стадией при МРТ всего тела, ни один случай не был диагностирован с более низкой стадией. Противоречивые результаты имели место из-за большей выявляемости пораженных лимфоузлов при МРТ всего тела и невыявленных новообразований в костном мозге, печени и почках при <sup>18</sup>F-ФДГ ПЭТ/КТ. Очаг в легком, диагностированный при помощи МРТ всего тела, соответствовал прикорневому лимфоузлу на ПЭТ/КТ, что указывает на возможные ограничения МРТ всего тела в данной локализации, вследствие дыхательных и сердечных двигательных артефактов.

В другом исследовании, включающем 140 нелеченых пациентов с лимфомой, сравнили диагностическую ценность МРТ всего тела для претерапевтической оценки ПЭТ-позитивных и ПЭТ-негативных лимфом [15]. В первой группе МРТ всего тела показала чувствительность 97,8% и специфичность 100%. Относительно стадирования, МРТ всего тела согласовалась с «золотым» стандартом у 94% пациентов. В группе с ПЭТ-негативными лимфомами чувствительность МРТ всего тела и ПЭТ/КТ была 93,5% и 64,5% соответственно. Статистическое согласие для этой подгруппы составило 92,5%. Оценивая различные подтипы лимфом, авторы пришли к выводу, что ПЭТ/КТ с фтордезоксиглюкозой несколько превосходит МРТ всего тела в стадировании лимфомы Ходжкина и диффузной крупноклеточной В-лимфомы, но не имеет существенных различий при стадировании фолликулярной лимфомы. В другом исследовании МРТ всего тела превосходила ПЭТ/КТ в оценке ПЭТ-негативных лимфом (MALT-лимфома) [20].

МРТ всего тела также существенна для оценки терапии при лимфомах. ДВИ используются для оценки изменений после лечения посредством измерения ИКД, значения которого

повышаются при снижении клеточной плотности вследствие некроза и клеточного распада [17, 18, 19]. Предыдущие исследования также показали взаимосвязь между неудачным лечением и низкими значениями ИКД после лечения. Однако больше исследований необходимо провести для оценки ДВИ для характеристики остаточной опухоли [19].

Еще одно исследование показало согласие результатов 97,1% между МРТ всего тела и <sup>18</sup>F-ФДГ ПЭТ/КТ при оценке ответа на терапию у ПЭТ-позитивных лимфом [15]. Таким образом, МРТ всего тела может быть хорошим выбором для оценки ответа на проводимое лечение [19].

#### **Костные метастазы.**

Костные метастазы являются главным проявлением поздних стадий онкологических заболеваний, поэтому оценка распространенности является необходимой для выбора лечения. Главными злокачественными опухолями, имеющими высокую тропность к костной ткани, являются рак легкого, предстательной и молочной желез. Роль МРТ всего тела в выявлении костных метастазов была изучена как в выборках пациентов со специфическим диагнозом, так и в смешанных популяциях пациентов с различной опухолевой патологией.

Традиционным первичным методом оценки костных структур является остеосцинтиграфия, представляющая определенные показатели чувствительности и специфичности: для рака предстательной железы чувствительность составила 70%, специфичность 57%; для рака молочной железы чувствительность – 62-100%, специфичность – 78-100%; для рака легкого чувствительность – 86%, специфичность – 88% [20 - 23]. Однако недостатками остеосцинтиграфии являются невозможность выявления очагов вторичного поражения в других тканях и отсутствие объективных критериев оценки динамики лечения. Благодаря последовательности ДВИ, которая позволяет выявлять мельчайшие изменения в костном мозге, некоторые исследования показали лучшие результаты диагностической эффективности при сравнении с остеосцинтиграфией, схожие либо более высокие при сравнении с <sup>18</sup>F-ФДГ ПЭТ/КТ. МРТ всего тела также имеет возможность оценить ответ на проводимое лечение посредством измерения количества и размеров очагов, оценки изменения структуры и интенсивности сигнала.

#### **Рак предстательной железы.**

Большинство руководств рекомендуют использование КТ и/или МРТ брюшной полости и остеосцинтиграфию для ранней оценки метастатического поражения у пациентов с высоким риском [24]. Несмотря на это, МРТ всего тела представляет эффективную альтернативу при выявлении костных метастазов, оценке проводимого лечения и прогноза. МРТ всего те-

ла была исследована в оценке вторичных костных образований у пациентов со средним и высоким риском распространения (ПСА >10 нг/дл, Глисон ≥7 или стадия выше T2b). По данным других исследований МРТ показала более высокую точность при выявлении ложноотрицательных очагов на остеосцинтиграфии [25].

В проспективном исследовании, включающем 100 больных раком предстательной железы высокого риска, МРТ всего тела (чувствительность – 96-100%, специфичность – 98-100%) показала лучшие результаты диагностической эффективности по сравнению с остеосцинтиграфией (чувствительность – 86%, специфичность – 98%) [26]. Padhani и коллеги предложили стандартизацию метода МРТ всего тела при сборе данных, интерпретации и протоколах описания у пациентов с высокой стадией рака предстательной железы [12].

В другом исследовании авторы проанализировали возможность местного (T) и отдаленного (N и M) стадирования у больных раком предстательной железы высокого риска, используя мультипараметрическую МРТ малого таза и МРТ всего тела, при этом сравнивая результаты с КТ и остеосцинтиграфией. Результаты показали преимущество МРТ (чувствительность – 100%, специфичность – 100%) перед остеосцинтиграфией/КТ (чувствительность – 85%, специфичность – 88%) [24].

#### **Рак молочной железы.**

Кости являются самым частым местом метастатического поражения при раке молочной железы. Тем не менее, до сих пор не было принято общее решение об использовании оптимального метода лучевой диагностики. С этой целью могут быть использованы остеосцинтиграфия, КТ, МРТ, ОФЭКТ или ПЭТ/КТ [26].

По аналогии с предстательной железой, остеосцинтиграфия является наиболее часто используемой методикой при первичной оценке стадирования, однако, МРТ всего тела позволяет выявлять вторичные очаги в костях с большей точностью [22, 27, 28]. Исследование с 22 пациентками показало более высокие показатели чувствительности и специфичности для МРТ всего тела (чувствительность – 92%, специфичность – 90%) в сравнении с остеосцинтиграфией (чувствительность – 83%, специфичность – 80%) [29]. Кроме того, МРТ всего тела выявила вторичные очаги в легких и печени, что не было возможно по результатам остеосцинтиграфии. По мнению Costelloe и коллег, в ближайшем будущем произойдет замена остеосцинтиграфии на МРТ всего тела [28].

МРТ всего тела имеет возможность выявить прогрессирование, не видимое при исследовании с помощью КТ, и тем самым способно повлиять на лечение и прогноз.

#### **Меланома.**

Меланома представляет агрессивную злокачественную опухоль с высоким потенциалом метастатического распространения (легкие, печень, кости, головной мозг). Присутствие и локализация отдаленных метастазов являются важными прогностическими факторами [30]. Таким образом, данные пациенты нуждаются в системном обследовании посредством различных методов визуализации, позволяющих провести сканирование всего тела (ПЭТ/КТ, МРТ всего тела).

МРТ всего тела может выявить распространение метастазов в отдаленные органы в рамках одного исследования и считается методом с высокой точностью при сравнении с  $^{18}\text{F}$ -ФДГ ПЭТ/КТ. Проспективное исследование с 35 пациентами показало лучшую чувствительность и одинаковую специфичность МРТ всего тела (82% и 92% соответственно) при сравнении с  $^{18}\text{F}$ -ФДГ ПЭТ/КТ (72,8% и 92,7% соответственно) в поиске вторичных очагов меланомы [31]. Высокие диагностические показатели касались выявления подкожных и перитонеальных очагов, очагов в печени и легких. В том же исследовании была показана добавочная ценность ДВИ в протоколе МРТ всего тела, выявление метастатических очагов было на 20% выше, чем при использовании только традиционных анатомических последовательностей. При сравнении МРТ всего тела без ДВИ  $^{18}\text{F}$ -ФДГ ПЭТ/КТ превосходила ее при выявлении вторичных очагов [32].

В другом исследовании авторы сделали заключение, что  $^{18}\text{F}$ -ФДГ ПЭТ/КТ имеет преимущество при выявлении очагов в легких и мягких тканях, в то время как МРТ всего тела более точна при поиске очагов в печени, костях и головном мозге. При оценке поражения лимфоузлов большее количество работ склоняется к мнению, что  $^{18}\text{F}$ -ФДГ ПЭТ/КТ является более точной методикой [31 - 33]. Однако имеются данные о равной эффективности [34].

#### **Исследование беременных пациенток.**

Диагностика злокачественных образований и стадирование во время беременности требует принятия осторожных решений. Литература не приводит доказательства вреда для плода при использовании магнитного поля в клинических условиях. Некоторые исследования не подтвердили наличие побочных эффектов у детей, подвергавшихся исследованию МРТ во время внутриутробного развития [35 - 37]. Однако выборка многих опубликованных исследований небольшая и имеется небольшое количество долгосрочных исследований с оценкой отсроченных результатов. Данные утверждения применимы для сканеров с напряженностью магнитного поля не более 3 Тл, и хотя некоторые авторы утверждают, что исследова-

ние не должно быть ограничено гестационным возрастом, другие исследователи рекомендуют избегать МРТ в первом триместре [38, 39]. Таким образом польза от проведения МРТ у беременных пациенток должна превосходить потенциальные риски, что неоспоримо в случае беременных пациенток с онкологическим заболеванием [38, 40].

Исследование, включающее 20 беременных пациенток с различными видами злокачественных новообразований, включая рак молочной железы (n=10), лимфому (n=3), рак шейки матки (n=2), рак яичников (n=1), рак прямой кишки (n=2), рак легкого (n=1) и конъюнктивы (n=1), показало, что МРТ всего тела является значимым одномоментным исследованием у беременных пациенток и имеет добавочную ценность как при оценке первичной опухоли (чувствительность – 95%, специфичность – 99%), так и при оценке отдаленных метастазов в лимфоузлы и другие органы (чувствительность – 66-100%, специфичность – 94-100%) в сравнении с традиционными методами обследования (чувствительность – 50% и специфичность – 100% при выявлении первичного очага; чувствительность – 33% и специфичность – 100% при оценке метастазов) [41].

#### **Использование в педиатрии.**

МРТ всего тела представляет неоспоримые преимущества над другими методами в диагностике патологии у пациентов детского возраста и позволяет проводить исследование всего тела с использованием седации [3, 42]. Показаниями к исследованию являются оценка опухолевой нагрузки в системных новообразованиях (лимфома), стадирование солидных опухолей, оценка ответа на лечение и скрининг наследственных опухолевых синдромов [43]. В случае стадирования солидных опухолей, МРТ всего тела показывает хорошую точность в выявлении костных и внекостных метастазов и должна рассматриваться как метод первичной диагностики у пациентов детского возраста [44]. Более того, исследования показали сравнимую диагностическую точность МРТ всего тела и ПЭТ/КТ при начальном стадировании лимфомы со специфичностью и чувствительностью 98%, 99% для нодальных и 91%, 99% для экстранодальных образований соответственно [45, 46]. Однако могут быть выделены недостатки при оценке метастазов в лимфоузлы и легкие, в особенности малых размеров.

Исследование Американского Колледжа Радиологии, включающее 188 пациентов с лимфомой, нейробластомой и некоторыми типами сарком показало чувствительность 53% и 67% при выявлении легочных метастазов и метастазов в лимфоузлы (6-12 мм) соответственно [47]. Одним из главных ограничений данного исследования считалось отсутствие последова-

тельности ДВИ в протоколе сканирования, которая могла при использовании повысить степень выявления патологических очагов. Кроме того, как доброкачественные, так и злокачественные лимфоузлы ограничивают диффузию [48]. Другой проблемой может считаться дифференциация высококлеточного гематопоезического костного мозга и диффузной инфильтрации костного мозга, так как в обоих случаях сигнал может быть гиперинтенсивный на STIR и может проявляться ограничение диффузии [48]. МРТ всего тела также может быть использована при оценке ответа на терапию (морфологическая и функциональная оценка) и различать активную опухолевую ткань при рецидиве и соединительную фиброзную ткань после лечения [49].

#### **Наследственные опухолевые синдромы.**

Главной целью оценки исследований у пациентов с наследственными синдромами является раннее выявление злокачественных новообразований у популяции с высоким риском. В данном случае методика МРТ всего тела была исследована, но общее мнение рутинного применения для скрининга неокончательно, несмотря на отсутствие рисков для данной группы пациентов [50]. При оценке данных исследований должны быть приняты во внимание ложноположительные результаты и случайные находки, которые будут приводить к дополнительным исследованиям и вмешательствам. Однако возможность проводить повторные исследования без риска для пациента представляется большим преимуществом [51]. Примерами наследственных синдромов являются множественная эндокринная неоплазия, синдром Гиппеля-Линдау, семейный аденоматозный полипоз и синдром Ли-Фраумени.

Существуют различные протоколы скрининга данных пациентов, включая биохимические тесты и методы лучевой визуализации. Однако данные протоколы различаются в зависимости от возрастной группы пациентов, пре-

валирующей опухолевой патологии и лечебного учреждения, где наблюдаются данные пациенты [51]. Villani и коллеги предложили протокол скрининга для детей и взрослых с синдромом Ли-Фраумени [52]. Согласно статье, кроме других методов лучевого исследования, МРТ всего тела проводится для скрининга мягкотканых опухолей и остеосарком. По заключению 3-х лет исследования результаты показали 100% выживаемость в группе скрининга (было выявлено 10 бессимптомных опухолей у 7 пациентов) в сравнении с пациентами, не проходившими скрининг, где выживаемость оказалась 20% (12 агрессивных опухолей у 10 пациентов).

#### **Заключение.**

МРТ всего тела можно считать многообещающей методикой, позволяющей получать результаты в рамках одного исследования. Методика играет ключевую роль в онкологии, благодаря возможности раннего выявления, стадирования опухоли и оценки проводимого противоопухолевого лечения, в особенности у беременных пациенток и пациентов детского возраста. Несмотря на данные преимущества, МРТ всего тела по-прежнему имеет проблемы, связанные с возникновением артефактов, технических ограничений и ошибок интерпретации, проявляющихся в ложноположительных и ложноотрицательных результатах. С другой стороны, продолжающиеся технические достижения, включая появление новых импульсных последовательностей, позволяют расширить спектр использования методики в клинической практике. Таким образом, ожидается дальнейшее развитие данной технологии в ближайшие годы, что в свою очередь будет требовать большего опыта использования данной методики от врачей лучевой диагностики.

#### **Источник финансирования и конфликт интересов.**

Авторы данной статьи подтвердили отсутствие финансовой поддержки исследования и конфликта интересов, о которых необходимо сообщить.

#### **Список литературы:**

1. Hernando C.G., Esteban L., Canas T. et al. The role of magnetic resonance imaging in oncology. *Clin Transl Oncol.* 2010; 12: 606-613.
2. Eustace S.J., Walker R., Blake M. et al. Whole-body MR imaging. Practical issues, clinical applications, and future directions. *Magn Reson Imaging Clin N Am.* 1999; 7: 209-236
3. Chavhan G.B., Babyn P.S. Whole-body MR imaging in children: principles, technique, current applications, and future directions. *Radiographics.* 2011; 31: 1757-1772.
4. Lecouvet F.E. Whole-body MR imaging: musculoskeletal applications. *Radiology.* 2016; 279: 345-365.
5. Schaefer J.F., Schlemmer H.P. Total body MR-imaging in oncology. *Eur Radiol.* 2006; 16: 2000-2015.
6. Antoch G., Vogt F.M., Freudenberg L.S. et al. Whole-body du-

- al-modality pet/ct and whole-body MRI for tumor staging in oncology. *JAMA.* 2003; 290: 3199-3206.
7. Etchebehere E.C., de Oliveira Santos A., Gumz B. et al. 68Ga-DOTATATE PET/CT, 99mTc-HYNIC-octreotide SPECT/CT, and whole-body MR imaging in detection of neuroendocrine tumors: a prospective trial. *J Nucl Med.* 2014; 55: 1598-1604.
8. Padhani A.R., Koh D.M., Collins D.J. Whole-body diffusion-weighted MR imaging in cancer: current status and research directions. *Radiology.* 2011; 261: 700-718.
9. Kwee T.C., Takahara T., Ochiani R. et al. Diffusion-weighted whole-body imaging with background body signal suppression (DWIBS): features and potential applications in oncology. *Eur. Radiol.* 2008; 18 (9): 1937-1952.
10. Koh D.M., Collins D.J. Diffusion weighted MRI in the body:

applications and challenges in oncology. *Am. J. Roentgenol.* 2007; 188: 1622-1635.

11. Koh D.M. Qualitative and quantitative analyses: image evaluation and interpretation. In Koh D.M., Thoeny H.C. eds. *Diffusion-weighted MR imaging: Applications in the Body.* Berlin, Germany: Springer; 2010: 33-47.

12. Padhani A.R., Lecouvet F.E., Tunariu N. et al. *METastasis Reporting and Data System for Prostate Cancer: practical guidelines for acquisition, interpretation, and reporting of whole-body magnetic resonance imaging-based evaluations of multiorgan involvement in advanced prostate cancer.* *Eur. Urol.* 2017; 71: 81-92.

13. Cheson B.D., Fisher R.I., Barrington S.F. et al. *Recommendations for initial evaluation, staging, and response assessment of Hodgkin and non-Hodgkin lymphoma: the Lugano Classification.* *J Clin Oncol.* 2014; 32: 3059-3067.

14. Van Ufford H.M., Kwee T.C., Beek F.J. et al. *Newly diagnosed lymphoma: initial results with whole-body T1-weighted, STIR, and diffusion-weighted MRI compared with 18F-FDG PET/CT.* *Am J Roentgenol.* 2011; 196: 662-669.

15. Mayerhoefer M.E., Karanikas G., Kletter K. et al. *Evaluation of diffusion-weighted magnetic resonance imaging for follow-up and treatment response assessment of lymphoma: results of an 18F-FDG PET/CT controlled prospective study in 64 patients.* *Clin Cancer Res.* 2015; 21: 2506-2513.

16. Toledano-Massiah S., Luciani A., Itti E. et al. *Whole-body diffusion-weighted imaging in Hodgkin lymphoma and diffuse large B-cell lymphoma.* *Radiographics.* 2015; 35: 747-764.

17. Chen Y., Zhong J., Wu H. et al. *The clinical application of whole-body diffusion-weighted imaging in the early assessment of chemotherapeutic effects in lymphoma: the initial experience.* *Magn Reson Imaging.* 2012; 30: 165-170.

18. Lin C., Itti E., Luciani A. et al. *Whole-body diffusion-weighted imaging with apparent diffusion coefficient mapping for treatment response assessment in patients with diffuse large B-cell lymphoma: pilot study.* *Invest Radiol.* 2011; 46: 341-349.

19. Kulkarni N.M., Pinho D.F., Narayanan S. et al. *Imaging for oncologic response assessment in lymphoma.* *AJR Am J Roentgenol.* 2017; 208: 18-31.

20. Morone M., Bali M.A., Tunariu N. et al. *Whole-body MRI: current applications in oncology.* *Am J Roentgenol.* 2017; 209: 336-349.

21. Even-Sapir E., Metser U., Mishani E. et al. *The detection of bone metastases in patients with high-risk prostate cancer: 99mTc-MDP planar bone scintigraphy, single- and multi-field-of-view SPECT, 18F-fluoride PET, and 18F-Fluoride PET/CT.* *J Nucl Med.* 2006; 47: 287-297.

22. Hamaoka T., Madewell J.E., Podoloff D.A. et al. *Bone imaging in metastatic breast cancer.* *J Clin Oncol.* 2004; 22: 2942-2953.

23. Qu X., Huang X., Yan W. et al. *A meta-analysis of 18FDG-PET-CT, 18FDG-PET, MRI and bone scintigraphy for diagnosis of bone metastases in patients with lung cancer.* *Eur J Radiol.* 2012; 81: 1007-1015.

24. Pasoglou V., Larbi A., Collette L. et al. *One-step TNM staging of high-risk prostate cancer using magnetic resonance imaging (MRI): toward an upfront simplified "all-in-one" imaging approach?* *Prostate.* 2014; 74: 469-477.

25. Jambor I., Kuisma A., Ramadan S. et al. *Prospective evaluation of planar bone scintigraphy, SPECT, SPECT/CT, 18F-NaF*

*PET/CT and whole body 1.5T MRI, including DWI, for the detection of bone metastases in high risk breast and prostate cancer patients: SKELETA clinical trial.* *Acta Oncol.* 2016; 55: 59-67.

26. Lecouvet F.E., El Mouedden J., Collette L. et al. *Can whole-body magnetic resonance imaging with diffusion-weighted imaging replace Tc 99m bone scanning and computed tomography for single-step detection of metastases in patients with high-risk prostate cancer?* *Eur Urol.* 2012; 62: 68-75.

27. Houssami N., Costelloe C.M. *Imaging bone metastases in breast cancer: evidence on comparative test accuracy.* *Ann Oncol.* 2012; 23: 834-843.

28. Costelloe C.M., Rohren E.M., Madewell J.E. et al. *Imaging bone metastases in breast cancer: techniques and recommendations for diagnosis.* *Lancet Oncol.* 2009; 10: 606-614.

29. Englehard K., Hollenbach H.P., Wohlfart K. et al. *Comparison of whole-body MRI with automatic moving table technique and bone scintigraphy for screening for bone metastases in patients with breast cancer.* *Eur Radiol.* 2004; 14: 99-105.

30. Balch C.M., Soong S.J., Gershenwald J.E. et al. *Prognostic factors analysis of 17600 melanoma patients: validation of the American Joint Committee on Cancer Melanoma Staging System.* *J Clin Oncol.* 2001; 19: 3622-3634.

31. Laurent V., Trausch G., Bruot O. et al. *Comparative study of two whole-body imaging techniques in the case of melanoma metastases: advantages of multi-contrast MRI examination including a diffusion-weighted sequence in comparison with PET-CT.* *Eur J Radiol.* 2010; 75: 376-383.

32. Pfannenber C., Aschoff P., Schanz S. et al. *Prospective comparison of 18F-fluorodeoxyglucose positron emission tomography/computed tomography and whole-body magnetic resonance imaging in staging of advanced malignant melanoma.* *Eur J Cancer.* 2007; 43: 557-564.

33. Pfannenber C., Schwenzler N. *Whole-body staging of malignant melanoma: advantages, limitations and current importance of PET-CT, whole-body MRI and PET-MRI.* *Radiologe.* 2015; 55: 120-126.

34. Jouvet J.C., Thomas L., Thomson V. et al. *Whole-body MRI with diffusion-weighted sequences compared with 18 FDG PET-CT, CT and superficial lymph node ultrasonography in the staging of advanced cutaneous melanoma: a prospective study.* *J Eur Acad Dermatol Venereol.* 2014; 28: 176-185.

35. Ray J.G., Vermeulen M.J., Bharatha A. et al. *Association between MRI exposure during pregnancy and fetal and childhood outcomes.* *JAMA.* 2016; 316: 952-961.

36. Strizek B., Jani J.C., Mucyo E. et al. *Safety of MR imaging at 1.5 T in fetuses: a retrospective case-control study of birth weights and the effects of acoustic noise.* *Radiology.* 2015; 275: 530-537.

37. Choi J.S., Ahn H.K., Han J.Y. et al. *A case series of 15 women inadvertently exposed to magnetic resonance imaging in the first trimester of pregnancy.* *J Obstet Gynaecol.* 2015; 35: 871-872.

38. Bulas D., Egloff A. *Benefits and risks of MRI in pregnancy.* *Semin Perinatol.* 2013; 37: 301-304.

39. Chen M.M., Coakley F.V., Kaimal A. et al. *Guidelines for computed tomography and magnetic resonance imaging use during pregnancy and lactation.* *Obstet Gynecol.* 2008; 112 (1): 333-340.

40. De Haan J., Vandecaveye V., Han S.N. et al. *Difficulties with diagnosis of malignancies in pregnancy.* *Best Pract Res Clin*

Obstet Gynaecol. 2016; 33: 19-32.

41. Dresen R.C., Han S.N., Michielsen K. et al. Whole-body diffusion-weighted MRI for staging of women with cancer during pregnancy: a pilot study. *Cancer Imaging*. 2015; 15 (1): 50.

42. Davis J.T., Kwatra N., Schooler G.R. Pediatric whole-body MRI: a review of current imaging techniques and clinical applications. *J Magn Reson Imaging*. 2016; 44:783-793.

43. Teixeira S.R., Elias Junior J., Nogueira-Barbosa M.H. et al. Whole-body magnetic resonance imaging in children: state of the art. *Radiol Bras*. 2015; 18: 111-120.

44. Krohmer S., Sorge I., Krausse A. et al. Whole-body MRI for primary evaluation of malignant disease in children. *Eur J Radiol*. 2010; 74: 256-261.

45. Punwani S., Taylor S.A., Bainbridge A. et al. Pediatric and adolescent lymphoma: comparison of whole-body STIR half-Fourier RARE MR imaging with with an enhanced PET/CT reference for initial staging. *Radiology*. 2010; 255: 182-190.

46. Littooi A.S., Kwee T.C. Barber I. et al. Whole-body MRI for initial staging of paediatric lymphoma: prospective comparison to an FDG-PET/CT-based reference standard. *Eur Radiol*. 2014;

24: 1153-1165.

47. Siegel M.J., Acharyya S., Hoffer F.A. et al. Whole-body MR imaging for staging of malignant tumors in pediatric patients: results of the American College of Radiology Imaging Network 6660 Trial. *Radiology*. 2013; 266: 599-609.

48. Nievelstein R.A., Littooi A.S. Whole-body MRI in paediatric oncology. *Radiol Med*. 2016; 121: 442-453.

49. Guimaraes M.D., Noschang J., Teixeira S.R. et al. Whole-body MRI in pediatric patients with cancer. *Cancer Imaging*. 2017; 17 :6.

50. Benusuglio P.R., Brugieres L., Caron O. Whole-body MRI screening in children with Li-Fraumeni and other cancer predisposition syndromes. *AJR Am J Roentgenol*. 2016; 206: 52.

51. Monsalve J., Kapur J., Malkin D. et al. Imaging of cancer predisposition syndromes in children. *Radiographics*. 2011; 31: 263-280.

52. Villani A., Tabori U., Schiffman J. et al. Biochemical and imaging surveillance in germline TP53 mutation carriers with Li-Fraumeni syndrome: a prospective observational study. *Lancet Oncol*. 2011; 12: 559-567.

### References:

1. Hernando C.G., Esteban L., Canas T. et al. The role of magnetic resonance imaging in oncology. *Clin Transl Oncol*. 2010; 12: 606-613.

2. Eustace S.J., Walker R., Blake M. et al. Whole-body MR imaging. Practical issues, clinical applications, and future directions. *Magn Reson Imaging Clin N Am*. 1999; 7: 209-236

3. Chavhan G.B., Babyn P.S. Whole-body MR imaging in children: principles, technique, current applications, and future directions. *Radiographics*. 2011; 31: 1757-1772.

4. Lecouvet F.E. Whole-body MR imaging: musculoskeletal applications. *Radiology*. 2016; 279: 345-365.

5. Schaefer J.F., Schlemmer H.P. Total body MR-imaging in oncology. *Eur Radiol*. 2006; 16: 2000-2015.

6. Antoch G., Vogt F.M., Freudenberg L.S. et al. Whole-body dual-modality pet/ct and whole-body MRI for tumor staging in oncology. *JAMA*. 2003; 290: 3199-3206.

7. Etchebehere E.C., de Oliveira Santos A., Gumz B. et al. 68Ga-DOTATATE PET/CT, 99mTc-HYNIC-octreotide SPECT/CT, and whole-body MR imaging in detection of neuroendocrine tumors: a prospective trial. *J Nucl Med*. 2014; 55: 1598-1604.

8. Padhani A.R., Koh D.M., Collins D.J. Whole-body diffusion-weighted MR imaging in cancer: current status and research directions. *Radiology*. 2011; 261: 700-718.

9. Kwee T.C., Takahara T., Ochiani R. et al. Diffusion-weighted whole-body imaging with background body signal suppression (DWIBS): features and potential applications in oncology. *Eur Radiol*. 2008; 18 (9): 1937-1952.

10. Koh D.M., Collins D.J. Diffusion weighted MRI in the body: applications and challenges in oncology. *Am. J. Roentgenol*. 2007; 188: 1622-1635.

11. Koh D.M. Qualitative and quantitative analyses: image evaluation and interpretation. In Koh D.M., Thoeny H.C. eds. *Diffusion -weighted MR imaging: Applications in the Body*. Berlin, Germany: Springer; 2010: 33-47.

12. Padhani A.R., Lecouvet F.E., Tunariu N. et al. METastasis Reporting and Data System for Prostate Cancer: practical guidelines for acquisition, interpretation, and reporting of whole-body magnetic resonance imaging-based evaluations of multiorgan

involvement in advanced prostate cancer. *Eur. Urol*. 2017; 71: 81-92.

13. Cheson B.D., Fisher R.I., Barrington S.F. et al. Recommendations for initial evaluation, staging, and response assessment of Hodgkin and non-Hodgkin lymphoma: the Lugano Classification. *J Clin Oncol*. 2014; 32: 3059-3067.

14. Van Ufford H.M., Kwee T.C., Beek F.J. et al. Newly diagnosed lymphoma: initial results with whole-body T1-weighted, STIR, and diffusion-weighted MRI compared with 18F-FDG PET/CT. *Am J Roentgenol*. 2011; 196: 662-669.

15. Mayerhoefer M.E., Karanikas G., Kletter K. et al. Evaluation of diffusion-weighted magnetic resonance imaging for follow-up and treatment response assessment of lymphoma: results of an 18F-FDG PET/CT controlled prospective study in 64 patients. *Clin Cancer Res*. 2015; 21: 2506-2513.

16. Toledano-Massiah S., Luciani A., Itti E. et al. Whole-body diffusion-weighted imaging in Hodgkin lymphoma and diffuse large B-cell lymphoma. *Radiographics*. 2015; 35: 747-764.

17. Chen Y., Zhong J., Wu H. et al. The clinical application of whole-body diffusion-weighted imaging in the early assessment of chemotherapeutic effects in lymphoma: the initial experience. *Magn Reson Imaging*. 2012; 30: 165-170.

18. Lin C., Itti E., Luciani A. et al. Whole-body diffusion-weighted imaging with apparent diffusion coefficient mapping for treatment response assessment in patients with diffuse large B-cell lymphoma: pilot study. *Invest Radiol*. 2011; 46: 341-349.

19. Kulkarni N.M., Pinho D.F., Narayanan S. et al. Imaging for oncologic response assessment in lymphoma. *AJR Am J Roentgenol*. 2017; 208: 18-31.

20. Morone M., Bali M.A., Tunariu N. et al. Whole-body MRI: current applications in oncology. *Am J Roentgenol*. 2017; 209: 336-349.

21. Even-Sapir E., Metser U., Mishani E. et al. The detection of bone metastases in patients with high-risk prostate cancer: 99mTc-MDP planar bone scintigraphy, single- and multi-field-of-view SPECT, 18F-fluoride PET, and 18F-Fluoride PET/CT. *J Nucl Med*. 2006; 47: 287-297.

22. Hamaoka T., Madewell J.E., Podoloff D.A. et al. Bone imag-

- ing in metastatic breast cancer. *J Clin Oncol.* 2004; 22: 2942-2953.
23. Qu X., Huang X., Yan W. et al. A meta-analysis of 18FDG-PET-CT, 18FDG-PET, MRI and bone scintigraphy for diagnosis of bone metastases in patients with lung cancer. *Eur J Radiol.* 2012; 81: 1007-1015.
24. Pasoglou V., Larbi A., Collette L. et al. One-step TNM staging of high-risk prostate cancer using magnetic resonance imaging (MRI): toward an upfront simplified "all-in-one" imaging approach? *Prostate.* 2014; 74: 469-477.
25. Jambor I., Kuisma A., Ramadan S. et al. Prospective evaluation of planar bone scintigraphy, SPECT, SPECT/CT, 18F-NaF PET/CT and whole body 1.5T MRI, including DWI, for the detection of bone metastases in high risk breast and prostate cancer patients: SKELETA clinical trial. *Acta Oncol.* 2016; 55: 59-67.
26. Lecouvet F.E., El Mouedden J., Collette L. et al. Can whole-body magnetic resonance imaging with diffusion-weighted imaging replace Tc 99m bone scanning and computed tomography for single-step detection of metastases in patients with high-risk prostate cancer? *Eur Urol.* 2012; 62: 68-75.
27. Houssami N., Costeloe C.M. Imaging bone metastases in breast cancer: evidence on comparative test accuracy. *Ann Oncol.* 2012; 23: 834-843.
28. Costeloe C.M., Rohren E.M., Madewell J.E. et al. Imaging bone metastases in breast cancer: techniques and recommendations for diagnosis. *Lancet Oncol.* 2009; 10: 606-614.
29. Englehard K., Hollenbach H.P., Wohlfart K. et al. Comparison of whole-body MRI with automatic moving table technique and bone scintigraphy for screening for bone metastases in patients with breast cancer. *Eur Radiol.* 2004; 14: 99-105.
30. Balch C.M., Soong S.J., Gershenwald J.E. et al. Prognostic factors analysis of 17600 melanoma patients: validation of the American Joint Committee on Cancer Melanoma Staging System. *J Clin Oncol.* 2001; 19: 3622-3634.
31. Laurent V., Trausch G., Bruot O. et al. Comparative study of two whole-body imaging techniques in the case of melanoma metastases: advantages of multi-contrast MRI examination including a diffusion-weighted sequence in comparison with PET-CT. *Eur J Radiol.* 2010; 75: 376-383.
32. Pfannenbergs C., Aschoff P., Schanz S. et al. Prospective comparison of 18F-fluorodeoxyglucose positron emission tomography/computed tomography and whole-body magnetic resonance imaging in staging of advanced malignant melanoma. *Eur J Cancer.* 2007; 43: 557-564.
33. Pfannenbergs C., Schwenzer N. Whole-body staging of malignant melanoma: advantages, limitations and current importance of PET-CT, whole-body MRI and PET-MRI. *Radiologe.* 2015; 55: 120-126.
34. Jouvets J.C., Thomas L., Thomson V. et al. Whole-body MRI with diffusion-weighted sequences compared with 18 FDG PET-CT, CT and superficial lymph node ultrasonography in the staging of advanced cutaneous melanoma: a prospective study. *J Eur Acad Dermatol Venereol.* 2014; 28: 176-185.
35. Ray J.G., Vermeulen M.J., Bharatha A. et al. Association between MRI exposure during pregnancy and fetal and childhood outcomes. *JAMA.* 2016; 316: 952-961.
36. Strizek B., Jani J.C., Mucyo E. et al. Safety of MR imaging at 1.5 T in fetuses: a retrospective case-control study of birth weights and the effects of acoustic noise. *Radiology.* 2015; 275: 530-537.
37. Choi J.S., Ahn H.K., Han J.Y. et al. A case series of 15 women inadvertently exposed to magnetic resonance imaging in the first trimester of pregnancy. *J Obstet Gynaecol.* 2015; 35: 871-872.
38. Bulas D., Egloff A. Benefits and risks of MRI in pregnancy. *Semin Perinatol.* 2013; 37: 301-304.
39. Chen M.M., Coakley F.V., Kaimal A. et al. Guidelines for computed tomography and magnetic resonance imaging use during pregnancy and lactation. *Obstet Gynecol.* 2008; 112 (1): 333-340.
40. De Haan J., Vandecaveye V., Han S.N. et al. Difficulties with diagnosis of malignancies in pregnancy. *Best Pract Res Clin Obstet Gynaecol.* 2016; 33: 19-32.
41. Dresen R.C., Han S.N., Michielsen K. et al. Whole-body diffusion-weighted MRI for staging of women with cancer during pregnancy: a pilot study. *Cancer Imaging.* 2015; 15 (1): 50.
42. Davis J.T., Kwatra N., Schooler G.R. Pediatric whole-body MRI: a review of current imaging techniques and clinical applications. *J Magn Reson Imaging.* 2016; 44:783-793.
43. Teixeira S.R., Elias Junior J., Nogueira-Barbosa M.H. et al. Whole-body magnetic resonance imaging in children: state of the art. *Radiol Bras.* 2015; 18: 111-120.
44. Krohmer S., Sorge I., Krausse A. et al. Whole-body MRI for primary evaluation of malignant disease in children. *Eur J Radiol.* 2010; 74: 256-261.
45. Punwani S., Taylor S.A., Bainbridge A. et al. Pediatric and adolescent lymphoma: comparison of whole-body STIR half-Fourier RARE MR imaging with with an enhanced PET/CT reference for initial staging. *Radiology.* 2010; 255: 182-190.
46. Littooij A.S., Kuwee T.C. Barber I. et al. Whole-body MRI for initial staging of paediatric lymphoma: prospective comparison to an FDG-PET/CT-based reference standard. *Eur Radiol.* 2014; 24: 1153-1165.
47. Siegel M.J., Acharyya S., Hoffer F.A. et al. Whole-body MR imaging for staging of malignant tumors in pediatric patients: results of the American College of Radiology Imaging Network 6660 Trial. *Radiology.* 2013; 266: 599-609.
48. Nievelstein R.A., Littooij A.S. Whole-body MRI in paediatric oncology. *Radiol Med.* 2016; 121: 442-453.
49. Guimaraes M.D., Noschang J., Teixeira S.R. et al. Whole-body MRI in pediatric patients with cancer. *Cancer Imaging.* 2017; 17 :6.
50. Benusuglio P.R., Brugieres L., Caron O. Whole-body MRI screening in children with Li-Fraumeni and other cancer predisposition syndromes. *AJR Am J Roentgenol.* 2016; 206: 52.
51. Monsalve J., Kapur J., Malkin D. et al. Imaging of cancer predisposition syndromes in children. *Radiographics.* 2011; 31: 263-280.
52. Villani A., Tabori U., Schiffman J. et al. Biochemical and imaging surveillance in germline TP53 mutation carriers with Li-Fraumeni syndrome: a prospective observational study. *Lancet Oncol.* 2011; 12: 559-567.