

Цитирование: Хоружик С.А. Магнитно-резонансная томография в медицинской практике // Здоровоохранение. – 2016. - № 8. – С. 40-47.

С. А. Хоружик

Магнитно-резонансная томография в медицинской практике

РНПЦ онкологии и медицинской радиологии им. Н.Н. Александрова

Представлены данные об истории возникновения метода магнитно-резонансной томографии (МРТ), принципах формирования МРТ-изображений, устройстве МР-сканера, процессе МРТ-сканирования и используемых импульсных последовательностях, преимуществах и недостатках МРТ по сравнению с рентгеновской компьютерной томографией, биологическом действии магнитных полей и противопоказаниях к проведению МРТ, использовании контрастных веществ, а также методике МРТ всего тела с диффузионно-взвешенным исследованием.

Ключевые слова: *магнитно-резонансная томография, компьютерная томография, диффузионно-взвешенное исследование.*

Магнитно-резонансная томография (МРТ, англ. MRI) – метод получения томографических (послойных) изображений внутренних органов человека с использованием явления ядерного магнитного резонанса (ЯМР). Ядерный магнитный резонанс – физическое явление, основанное на свойствах некоторых атомных ядер при помещении их в постоянное магнитное поле поглощать энергию в радиочастотном (РЧ) диапазоне и излучать ее после прекращения воздействия РЧ импульса. При этом напряженность постоянного магнитного поля и частота РЧ магнитного поля должны строго соответствовать друг другу, в случае чего возникает резонанс. Помимо метода МРТ явление ЯМР используется в аналитической химии (ЯМР-спектроскопия). Ранее существовавшая аббревиатура ЯМР-томография в настоящее время не используется, поскольку слово «ядерный» ассоциируется с ядерной энергией,

радиоактивностью или облучением, что не имеет к МРТ никакого отношения [1, 2].

Явление ЯМР в жидкостях и твердых телах открыли в 1946 г. независимо друг от друга американские исследователи Феликс Блох и Эдвард Пурселл, получившие за это Нобелевскую премию по физике в 1952 г. В 1972 г. американец Пол Лаутербур получил первое в мире двухмерное МР-изображение двух стеклянных капилляров, заполненных жидкостью. На получение этого изображения ушло 4 часа 45 минут. Первое МРТ-изображение человека (пальцы кисти) было представлено Питером Мэнсфилдом в Лондоне в 1976 г. На сканирование уходило уже от 15 до 23 минут. За изобретение метода МРТ П. Лаутербур и П. Мэнсфилду была присуждена Нобелевская премия по медицине в 2003 г. Вклад в развитие метода внес американец Раймонд Дамадьян, который в 1974 г. получил патент «Аппаратура и метод обнаружения раковой ткани». Дамадьян измерил времена релаксации удаленных образцов нормальных и раковых тканей мышей и заключил, что опухоли имеют более длительные времена релаксации. С начала 1980-х гг. МР-томографы стали использоваться для исследований всего тела человека. В настоящее время МРТ является одним из основных томографических методов лучевой диагностики в медицине, во многих случаях превосходящим рентгеновскую компьютерную томографию (КТ) по диагностической эффективности.

Принципы формирования МРТ-изображений

Метод МРТ основан на измерении отклика атомов водорода на возбуждение их определенной комбинацией электромагнитных волн (РЧ импульсами) в постоянном магнитном поле [3]. Почему в клинической МРТ основную роль в формировании изображений играет водород? Для этого имеются две основные причины:

1) большая распространенность водорода в организме человека – он входит в состав молекул воды (H_2O), из которой на $2/3$ состоит тело человека, а также в состав белков, жиров и углеводов (химические группы CH_2 и другие);

2) большой магнитный момент, т. е. способность выстраиваться вдоль внешнего магнитного поля. Ядро атома водорода состоит из заряженной частицы (протона) и нейтральной частицы (нейтрона). Положительно заряженный протон обуславливает наличие у водорода магнитных свойств.

Формирование МРТ-изображения включает следующие основные этапы:

1) сканируемый объект помещается во внешнее постоянное магнитное поле, в котором протоны водорода приобретают продольную, т. е. совпадающую по направлению с внешним магнитным полем, намагниченность;

2) в объект подаются кратковременные РЧ импульсы, обуславливающие отклонение намагниченности в заданную плоскость. В типичном случае используют 90° РЧ импульс, отклоняющий намагниченность в поперечную плоскость;

3) после прекращения воздействия РЧ импульса намагниченность начинает возвращаться в исходное положение, что называют релаксацией. При этом сканируемым слоем испускается РЧ сигнал, улавливаемый МР-сканером и преобразуемый в изображение.

Кроме постоянного и РЧ магнитных полей в МРТ используют еще одно магнитное поле – градиентное. Оно служит для выделения слоя – выбора плоскости сканирования и толщины среза. В отличие от КТ, при которой томограмму можно получить только в плоскости механически вращающихся вокруг пациента рентгеновской трубки и детектора излучения (в большинстве случаев это трансверсальная плоскость), при МРТ плоскость сканирования определяется направлением приложения градиентного магнитного поля и может быть любой – трансверсальной, сагиттальной, коронарной или наклоненной к ним (рис. 1).

Основные компоненты МР-сканера

Основными компонентами МР-сканера являются магнит, радиочастотная система, градиентная система, стол пациента и компьютер для управления процессом сканирования и реконструкции изображений (рис. 2) [2].

Магнит создает внешнее постоянное магнитное поле, основной характеристикой которого является напряженность или сила, выражаемая в Тесла (Тл). По силе магнитного поля МР-томографы разделяют на низкопольные ($< 0,5$ Тл), среднепольные (0,5-1 Тл), высокопольные (1-2 Тл) и сверхвысокопольные (> 2 Тл). В клинической практике наиболее распространены томографы с напряженностью 1,5 Тл, которые на сегодня считаются оптимальными по соотношению качества изображений, функциональных возможностей сканера и цены. Все более распространенными становятся сканеры с напряженностью 3 Тл. В последние годы началась клиническая эксплуатация аппаратов с напряженностью 7 Тл (рис. 3). Консорциумом Европейских компаний и университетов проводятся работы по созданию МР-томографа 11,7 Тл, которые должны быть завершены в 2016 г.

Преимуществом сверхвысокопольных сканеров является более высокая детализация изображений, что особенно важно в нейровизуализации. К недостаткам относится увеличение количества энергии, передаваемой сканируемому объекту, что требует соблюдения определенных предосторожностей. Кроме этого сложнее создать полную однородность магнитного поля, что может снизить качество изображений при некоторых исследованиях (например, с подавлением сигнала от жира).

В зависимости от конструкции магниты разделяют на закрытые (рис. 2) и открытые. В первом случае томограф имеет туннель, в который помещается сканируемый объект в положении лежа. Преимуществом открытых магнитов является отсутствие туннеля, что делает условия сканирования более комфортными для пациента и позволяет проводить интервенционные вмешательства. Одна из разновидностей МР-сканеров с магнитом открытого типа позволяет проводить исследования пациента в положении сидя или стоя, т.

е. в условиях физиологической нагрузки на позвоночник. Недостаток открытых магнитов – меньшая напряженность магнитного поля (в настоящее время не более 1,2 Тл). С технической точки зрения магниты бывают постоянного, резистивного и сверхпроводящего типа. В высокопольных МР-сканерах используются магниты сверхпроводящего типа, предусматривающие охлаждение жидким гелием.

РЧ и градиентные магнитные поля создаются с помощью специальных приспособлений, называемых катушками. РЧ катушки отвечают за передачу и прием из сканируемого объекта РЧ сигналов (рис. 4). Для сканирования определенной анатомической зоны используют специально предназначенные для нее РЧ катушки, которые могут быть съемными (например, для сканирования головного мозга, брюшной полости, коленного сустава) или встроенными в стол пациента (для сканирования позвоночника) или в обшивку магнита (для сканирования всего тела). Градиентные катушки встроены в обшивку магнита.

Контраст МР-изображений и основные импульсные последовательности

В отличие от КТ, при которой плотность тканей может быть измерена в единицах Хаунсфилда, при МРТ говорят об интенсивности сигнала, которую не принято оценивать количественно, т. к. она существенно варьирует в зависимости от большого количества факторов [2, 4]. Интенсивность сигнала (контраст тканей) в МРТ определяется, в основном, четырьмя параметрами:

- 1) протонной плотностью (количеством протонов в исследуемой ткани);
- 2) временем продольной релаксации тканей (обозначается как время T1);
- 3) временем поперечной релаксации тканей (время T2);
- 4) движением или диффузией исследуемых структур.

В каждом МР-изображении присутствует контраст, обусловленный как протонной плотностью, так и T1- и T2-релаксацией. В зависимости от их соотношения говорят о T1-взвешенных изображениях (T1-ВИ, англ. T1-

weighted, T1w), T2-взвешенных (T2-ВИ, T2w) или об изображениях протонной плотности (англ. Proton Density, PD), которые также называют средне взвешенными.

Специально разработанные импульсные последовательности (ИП) определяют вклад того или иного параметра в интенсивность сигнала изображения для получения оптимального контраста между нормальными и патологическими тканями [5]. ИП – это набор радиочастотных и градиентных импульсов заданной формы, амплитуды и интервала между ними, многократно повторяемых во время сканирования и определяющих контраст МР-изображений. Другими словами, ИП – это компьютерная программа, управляющая МР-сканером в процессе сканирования.

Основными техническими параметрами ИП являются время повторения (англ. repetition time, TR), время эха (англ. echo time, TE), время инверсии (англ. inversion time, TI), угол отклонения (англ. flip angle). Используемые в клинической практике ИП можно схематически разделить на следующие группы:

- 1) Спин-эхо;
- 2) Турбо-спин-эхо – быстрое спин-эхо;
- 3) Градиентное эхо – еще более быстрые ИП;
- 4) Инверсия-восстановление:
 - FLAIR – подавление сигнала от свободной жидкости (темная жидкость);
 - STIR – подавление сигнала от жира;
- 5) МР-ангиография (МРА):
 - без внутривенного (в/в) введения контрастного вещества (КВ):
 - время-пролетная (англ. time of flight) МР-ангиография (ToF-МРА);
 - фазово-контрастная МР-ангиография;
 - с в/в введением КВ (контрастно-усиленная МРА);
- 6) Эхопланарная визуализация – сверхбыстрые ИП:

- диффузионно-взвешенная МРТ (диффузионно-взвешенное исследование, ДВИ, англ. DWI) и ее разновидность диффузионная тензорная МРТ (трактография, англ. DTI);
- перфузионная МРТ – с болюсным в/в контрастным усилением;
- функциональная МРТ (фМРТ);

7) МР-спектроскопия (МРС):

- одновоксельная;
- мультिवоксельная.

Для того чтобы отличить Т2-ВИ от Т1-ВИ можно использовать следующие способы. Во-первых, на Т2-ВИ вода имеет повышенный сигнал (белая), а на Т1-ВИ – сниженный (темная) (рис. 5). Обычно оценивают интенсивность сигнала спинномозгового ликвора. Во-вторых, можно обращать внимание на значения параметров TR и TE. Так, при использовании спин-эховых и турбо-спин-эховых ИП эти параметры обычно составляют для Т2-ВИ – TR > 1600 мс, TE > 60 мс; для Т1-ВИ – TR 300-600 мс, TE 10-20 мс; для изображений протонной плотности – TR > 2000 мс, TE – 20 мс.

Считается, что Т2-ВИ по своей контрастности наиболее информативны для выявления патологии – большинство опухолей имеют повышенное содержание воды и поэтому на Т2-ВИ характеризуются повышенным сигналом. Т1-ВИ позволяют установить серозную (сниженный сигнал) или геморрагическую (в подостром периоде – повышенный сигнал) природу жидкостных образований, а также используются для оценки контрастного усиления после в/в введения гадолиний-содержащих КВ. Изображения протонной плотности хорошо визуализируют суставной хрящ и наиболее широко используются при МРТ суставов [6].

МРТ-сканирование обычно включает получение Т2-ВИ и Т1-ВИ в одной или нескольких плоскостях, при необходимости – Т1-ВИ после в/в введения КВ и ряд дополнительных ИП. Получение каждой серии изображений занимает от 1 до 7 минут, в среднем – 2-3 мин. В итоге общая длительность МРТ-сканирования составляет в среднем 20-40 мин, а в некоторых случаях может

достигать 1 часа и более. Необходимо отметить, что контрастная разрешающая способность, пространственная разрешающая способность (толщина среза) МР-изображений и длительность сканирования имеют обратную связь друг с другом – так называемый «Бермудский треугольник». Это означает, что для получения более контрастных и трехмерных (тонкие срезы) изображений требуется больше времени. Поэтому до начала МРТ-исследования необходимо четко понять стоящие перед ним задачи, чтобы определить оптимальный с точки зрения качества изображений и длительности сканирования протокол исследования.

Преимущества и недостатки МРТ по сравнению с КТ

Как и КТ, МРТ является неинвазивным томографическим методом лучевой диагностики. К преимуществам МРТ относятся:

1) более высокая контрастная разрешающая способность. Например, при МРТ очаги в головном мозге нередко визуализируются лучше, чем при КТ; фибромиома матки при КТ не отличается по плотности от тканей матки, при МРТ – имеет сниженный сигнал на T2-ВИ и четко визуализируется; суставной хрящ хорошо визуализируется на МРТ-изображениях в отличие от КТ;

2) отсутствие ионизирующего излучения, что позволяет проводить МРТ всего тела и повторять исследование в динамике, что особенно важно в онкологии для стадирования злокачественных опухолей и оценки эффективности лечения;

3) отсутствие артефактов от костной ткани – преимущество при оценке базальных отделов головного мозга;

4) естественный контраст от движущейся крови – исследование сосудов без в/в контрастирования;

5) исследование функции органов: измерение скорости кровотока, уровня диффузии в тканях с помощью ДВИ, метаболизма тканей с помощью МРС, визуализация активации коры головного мозга с помощью фМРТ.

Одним из преимуществ МРТ ранее считали возможность сканирования в любой плоскости, а не только в аксиальной, как при КТ. Однако с появлением многосрезовых КТ-сканеров стало возможным получение тонких аксиальных КТ-срезов с последующей реконструкцией изображений в любой плоскости.

К основным недостаткам МРТ по отношению к КТ относятся:

1) более длительное сканирование, что может стать причиной двигательных артефактов и снижает пропускную способность аппарата;

2) недостаточная визуализация легочной ткани – воздух не создает МР-сигнала, но визуализируется легочный интерстиций;

3) невозможность надежного выявления кальцификатов, некоторых видов патологии костных структур – кальций не дает МР-сигнала, визуализируется костный мозг, а не костная ткань;

4) подверженность МР-изображений артефактам, в том числе за счет неоднородности магнитного поля;

4) невозможность обследования пациентов с клаустрофобией, искусственными водителями сердечного ритма, наличие других противопоказаний;

5) высокая стоимость оборудования и его эксплуатации.

Учитывая сказанное, МРТ имеет преимущества перед КТ при визуализации головного и спинного мозга, органов таза у мужчин и женщин, суставов [6, 7]. При патологии легких, для диагностики ряда заболеваний костных структур, а также у пациентов, которые не могут длительно и осознанно соблюдать неподвижность во время сканирования, предпочтительнее выполнять КТ. При МРТ брюшной полости может потребоваться многократная задержка дыхания, в случае неспособности пациента ее выполнять информативность исследования значительно снижается. При выборе метода обследования необходимо учитывать и другие факторы, такие как длительность сканирования и доступность соответствующего оборудования.

Биологическое действие магнитных полей и противопоказания к МРТ

Энергия, передаваемая объекту электромагнитным излучением, пропорциональна его частоте. Используемые в МРТ радиоволны имеют частоту порядка 10^7 Гц, в то время как рентгеновское излучение – 10^{19} Гц. Из этого следует, что рентгеновские лучи передают тканям гораздо больше энергии, чем радиоволны, частота которых даже ниже, чем у видимого света. В этой связи метод МРТ считается безопасным для человека, однако имеет ряд ограничений. Магнитное поле сканера с напряженностью магнитного поля 1,5 Тл в 30000 раз сильнее магнитного поля Земли. Поэтому МРТ противопоказана при наличии у пациента кардиостимулятора (его работа может нарушаться с потенциальной угрозой для жизни) и других электронных имплантированных устройств, ферромагнитных интракраниальных аневризмальных клипс, инородных металлических тел в орбитах (угроза смещения и повреждения тканей). Не рекомендуется проводить МРТ в первые три месяца беременности по причине неизученности возможных эффектов на плод. Несъемные металлические зубные коронки, протезы суставов, немагнитные (титановые, танталовые, из нержавеющей стали, биodeградебельные) стенты и аневризмальные клипсы не опасны для проведения МРТ спустя 2-4 недели после их установки. Вместе с тем, металлические имплантаты, находящиеся в зоне сканирования, вызывают артефакты, создающие сложности для интерпретации результатов исследования. МРТ невозможно провести при наличии у пациента боязни замкнутого пространства (клаустрофобии), которая встречается не более чем у 4% населения. У маленьких детей (обычно до 5 лет) исследование проводится в состоянии медикаментозного сна.

К другим возможным негативным эффектам используемых в МРТ магнитных полей относятся [8]:

- 1) кратковременное головокружение, металлический привкус во рту во время или сразу после сканирования – обычно не возникают при напряженности магнитного поля менее 3 Тл;

2) локальное повышение температуры тканей – не возникает при соблюдении рекомендации по параметру «норма специфической абсорбции» (англ. specific absorption rate, SAR);

3) стимуляция периферических нервов с произвольными сокращениями мышечных волокон – практически не встречается на сканерах с напряженностью поля 1,5 Тл;

4) сильный шум в процессе сканирования, обусловленный нормальной работой аппарата.

Перед началом исследования пациент заполняет анкету с вопросами о возможных противопоказаниях. Снимаются любые металлические украшения, предметы и элементы одежды. Другой специальной подготовки к МРТ обычно не требуется.

Использование контрастных веществ при МРТ

При МРТ используют контрастные вещества на основе редкоземельного элемента гадолиния (омнискан, магневист, оптимарк, гадовист и другие), которые вводят струйно в локтевую вену в дозе 0,2 мл на килограмм массы тела пациента (гадовист – в дозе 0,1 мл/кг). В ряде случаев, например при перфузионной МРТ и МРТ молочных желез, рекомендуется болюсное введение, т. е. с помощью автоматического инжектора. После в/в введения препарат проникает через поврежденный гематоэнцефалический барьер (при злокачественных опухолях, ишемии, инфекционно-воспалительных и демиелинизирующих заболеваниях головного мозга), а также накапливается в нормальных и патологических экстракраниальных тканях. Для оценки контрастного усиления проводят сканирование с использованием T1-ВИ, на которых патологические образования приобретают повышенный сигнал. В онкологии использование МР-контрастных веществ играет важную роль как при определении распространенности опухолевого процесса, так и при контроле эффективности лечения [6]. У беременных женщин использование

гадолиний-содержащих КВ допускается лишь в случае крайней необходимости, поскольку КВ проникает через плаценту и может накапливаться в амниотической жидкости. У кормящих грудью женщин ограничений для в/в контрастирования при МРТ не установлено [9].

Еще одной группой МР-контрастных веществ являются наночастицы оксида железа. Показана высокая эффективность их использования для диагностики метастазов в лимфатических узлах. В отличие от гадолиниевых препаратов частицы оксида железа вызывают снижение сигнала от нормальных тканей лимфоузла на T2-ВИ. В настоящее время данные препараты не представлены на рынке.

МРТ всего тела с диффузионно-взвешенным исследованием

Как отмечалось выше, МРТ является нерадиационным безопасным методом обследования пациентов, что с учетом высокой контрастной разрешающей способности делает его весьма подходящим для сканирования всего тела, особенно в онкологии. Программа сканирования всего тела может отличаться в зависимости от технических возможностей МР-сканера, опыта и предпочтений врача-диагноста, но обычно включает T2-ВИ и T1-ВИ в коронарной плоскости, ДВИ в трансверсальной плоскости. Преимущество ДВИ особенно очевидно у онкологических пациентов – первичные и метастатические злокачественные опухоли имеют повышенный сигнал на фоне подавления сигнала от нормальных тканей, что делает ДВИ-изображения подобными на изображения позитронной эмиссионной томографии (рис. 6). При ДВИ не требуется в/в введение КВ, т. е. методика является абсолютно неинвазивной. В РНПЦ онкологии и медицинской радиологии им. Н.Н. Александрова первая МРТ-ДВИ всего тела была проведена 20 марта 2012 г. у пациента с лимфомой Ходжкина на МР-томографе Optima 450w 1,5 Тл (Дженерал Электрик, США). Общее время сканирования всего тела, включая шею, грудную, брюшную полость и таз, в зависимости от роста пациента

составляет 34-40 минут, из них ДВИ – 18-23 минуты. Подробно протокол сканирования всего тела описан в нашей предыдущей публикации [10]. За истекший период выполнено 256 МРТ-ДВИ всего тела у 165 пациентов с лимфомами и 36 исследований у 23 пациентов с другими злокачественными опухолями (рак предстательной, молочной железы, шейки матки, яичников, меланома) и заболеваниями (лихорадка неясного генеза, миелофиброз). При лимфомах МРТ-ДВИ всего тела выполняли до начала лечения с целью определения исходной распространенности опухолевого процесса (стадирования) и после окончания химиотерапии с целью оценки эффективности лечения (рестадирования) (рис. 6). Преобладание пациентов с лимфомами связано с выполнением НИР «Разработать и внедрить метод определения распространённости опухолевого процесса, прогнозирования и контроля эффективности лечения злокачественных лимфом на основе использования диффузионно-взвешенной магнитно-резонансной томографии» (2013-2017 гг.). Показана более высокая диагностическая эффективность МРТ-ДВИ всего тела при стадировании лимфом по сравнению с КТ [10].

Заключение

МРТ является высокоинформативным и безопасным томографическим методом лучевой диагностики. По сравнению с КТ метод имеет ряд существенных преимуществ, обуславливающих его все более широкое использование в клинической практике. Грамотное применение МРТ требует учета показаний и противопоказаний, а также адаптации протокола сканирования в соответствии с конкретной клинической задачей. Достаточно новой высокоинформативной методикой МРТ является ДВИ. Высокая контрастная разрешающая способность и отсутствие ионизирующего излучения делают метод МРТ-ДВИ особенно подходящим для исследования всего тела, особенно у пациентов с онкологическими заболеваниями.

ЛИТЕРАТУРА

1. Хоружик С. А. Общие принципы магнитно-резонансной томографии. В кн.: Суконко О. Г., ред. Руководство по онкологии. Т. 1. Минск: Беларус. Энцикл. им. П. Бровки; 2015: 258-265.
2. Ринк П. А. Магнитный резонанс в медицине. Основной учебник Европейского форума по магнитному резонансу. М.: ГЭОТАР-Медиа; 2003. 256 с.
3. McRobbie D. W., Moore E. A., Graves M. J., Prince M. R. MRI from Picture to Proton. Cambridge, England: Cambridge University Press; 2006. 402 p.
4. Pooley R. A. AAPM/RSNA physics tutorial for residents: fundamental physics of MR imaging // Radiographics. – 2005. – Vol. 25, № 4. – С. 1087-1099.
5. Bitar R., Leung G., Perng R., et al. MR pulse sequences: what every radiologist wants to know but is afraid to ask // Radiographics. – 2006. – Vol. 26, № 2. С. 513-537.
6. Liney G. MRI in Clinical Practice. Springer; 2006. 128 p.
7. Reimer P., Parizel P. M, Meaney J. F. M, Stichnoth, F. A. Clinical MR Imaging. A Practical Approach. Springer; 2010. 850 p.
8. Shellock F. G., Crues J. V. MR procedures: biologic effects, safety, and patient care // Radiology. – 2004. – Vol. 232, № 3. – С. 635-652.
9. Committee opinion No. 656: Guidelines for diagnostic imaging during pregnancy and lactation // Obstet. Gynecol. – 2016. – Vol. 127, № 2. – P. e75-80.
10. Хоружик С. А., Жаврид Э. А., Сачивко Н. В., Портасова Н. П., Карман Е.И., Карман А.В. Сравнение возможностей диффузионно-взвешенной магнитно-резонансной томографии всего тела и рентгеновской компьютерной томографии при стадировании лимфом // Онкологический журнал. – 2015. – Т. 9, № 1. – С. 43-48.

REFERENCES

1. Kharuzhyk S. A. General principles of magnetic resonance imaging. In: Sukonko OG, ed. Textbook of oncology. Vol. 1. Minsk: Belarus. Encycl. named P. Brovki; 2015: 258-265 (in Russian).
2. Rink P. A. Magnetic resonance in medicine. The main textbook of the European Forum on Magnetic Resonance. M.: GEOTAR-Media; 2003. 256 p (in Russian).
3. McRobbie D. W., Moore E. A., Graves M. J., Prince M. R. MRI from Picture to Proton. Cambridge, England: Cambridge University Press; 2006. 402 p.
4. Pooley R. A. AAPM/RSNA physics tutorial for residents: fundamental physics of MR imaging // Radiographics. – 2005. – Vol. 25, № 4. – C. 1087-1099.
5. Bitar R., Leung G., Perng R., et al. MR pulse sequences: what every radiologist wants to know but is afraid to ask // Radiographics. – 2006. – Vol. 26, № 2. C. 513-537.
6. Liney G. MRI in Clinical Practice. Springer; 2006. 128 p.
7. Reimer P., Parizel P. M, Meaney J. F. M, Stichnoth, F. A. Clinical MR Imaging. A Practical Approach. Springer; 2010. 850 p.
8. Shellock F. G., Crues J. V. MR procedures: biologic effects, safety, and patient care // Radiology. – 2004. – Vol. 232, № 3. – C. 635-652.
9. Committee opinion No. 656: Guidelines for diagnostic imaging during pregnancy and lactation // Obstet. Gynecol. – 2016. – Vol. 127, № 2. – P. e75-80.
10. Kharuzhyk S. A., Zhavrid E. A., Sachivko N. V., Portasova N. P., Karman E. I., Karman A. V. Possibilities of whole-body diffusion-weighted magnetic resonance imaging compared to X-ray computed tomography in staging lymphoma // Oncological Journal. – 2015. – Vol. 9, № 1. – P. 43-48 (in Russian).

Рисунки

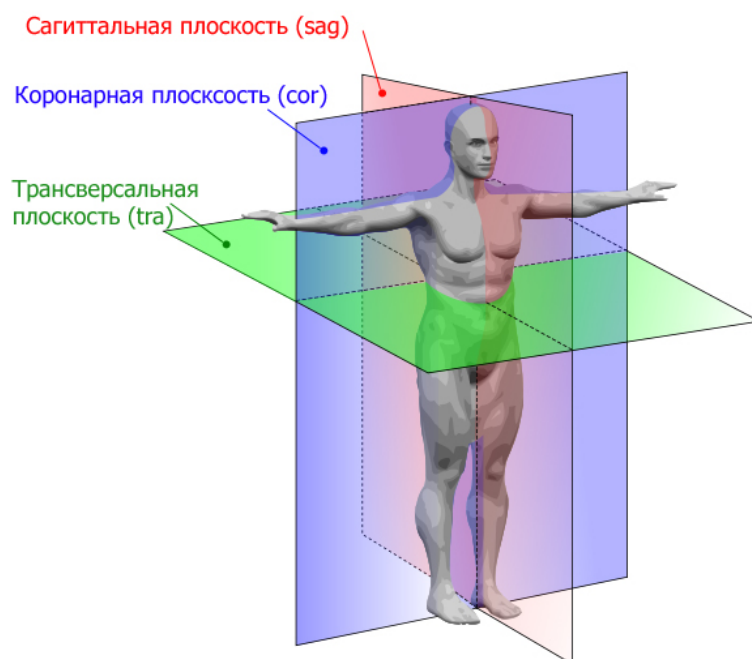


Рис. 1. Стандартные плоскости, в которых наиболее часто производят МРТ-сканирование

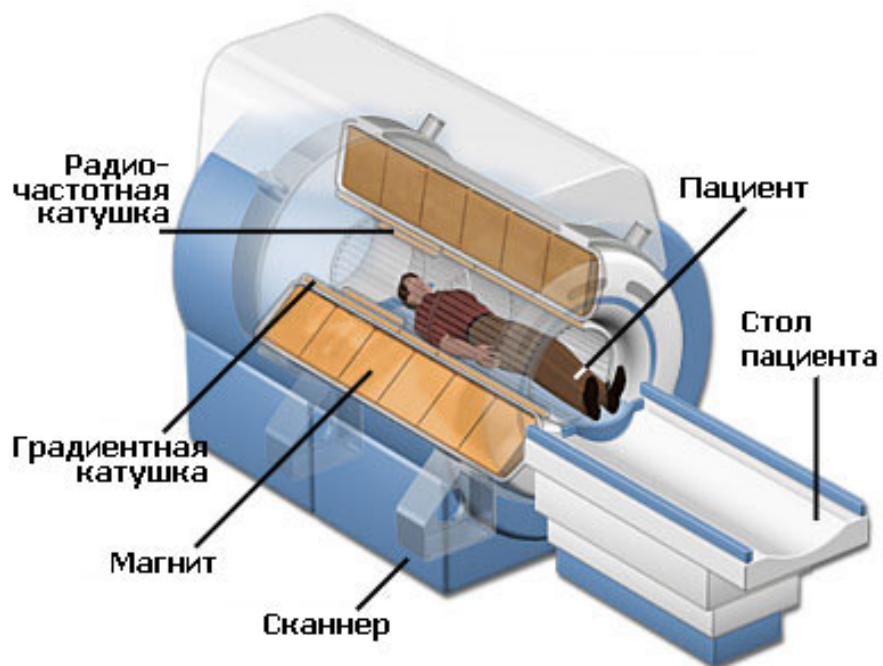
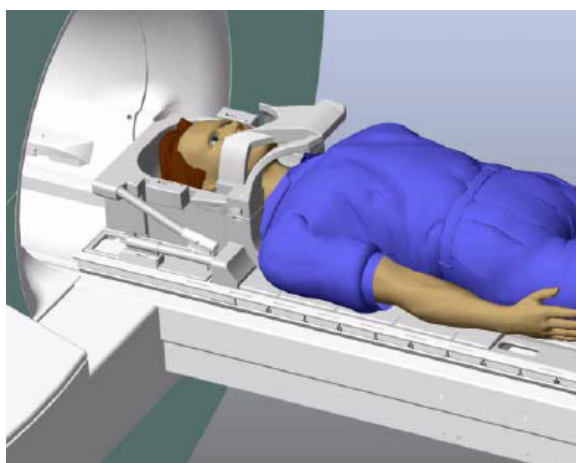


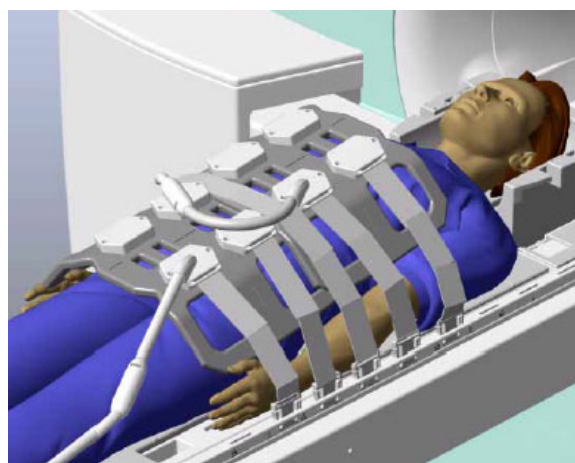
Рис. 2. Основные компоненты МР-сканера



Рис. 3. МРТ-изображение головного мозга, полученное на сканере с напряженностью магнитного поля 7 Тл, демонстрирует высокую пространственную разрешающую способность

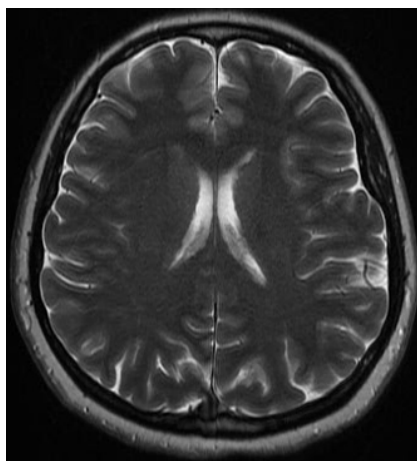


а

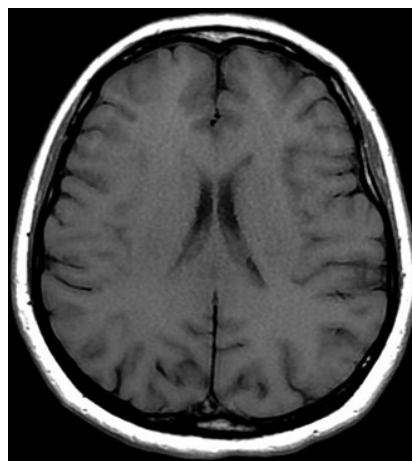


б

Рис. 4. Съемные подключаемые РЧ катушки для сканирования головного мозга (а) и туловища (б)

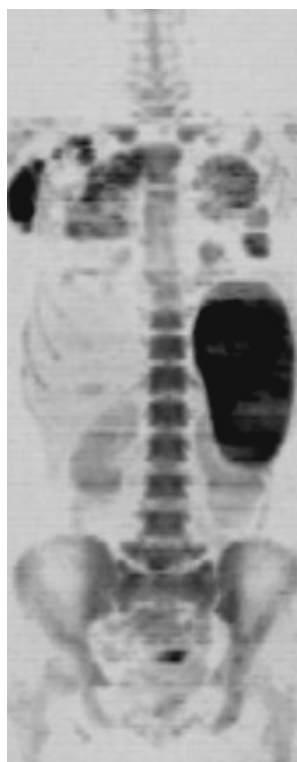


а



б

Рис. 5. T2-ВИ (а) и T1-ВИ (б) головного мозга



а



б

Рис. 6. Пациентка Ж., 45 лет с неходжкинской лимфомой. При ДВИ всего тела до лечения (а) определяются увеличенные лимфоузлы выше диафрагмы, поражения в легких, спленомегалия. После 8 курсов химиотерапии (б) все поражения регрессировали, размеры селезенки нормализовались

MAGNETIC RESONANCE IMAGING IN MEDICAL PRACTICE

S. A. Kharuzhyk

The data about history of the method of magnetic resonance imaging (MRI), principles of formation of MRI images, MR scanner components, process of MRI scanning and used pulse sequences, advantages and disadvantages of MRI compared with X-ray computed tomography, biological effects of magnetic fields and contraindications to MRI, use of contrast agents as well as the method of whole-body MRI with diffusion-weighted imaging are presented.

Key words: *magnetic resonance imaging, computed tomography, diffusion-weighted imaging.*