

Министерство здравоохранения Республики Беларусь
Учреждение образования
«Гомельский государственный медицинский университет»

Кафедра лучевой диагностики с курсом ФПКиП

Автор:

Е.С.Зиновкина, ассистент

МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ

для проведения практического занятия
по учебной дисциплине
Медицинская визуализация

для студентов 5 курса медико-диагностического факультета, обучающихся
по специальности 1-79 01 04 «Медико-диагностическое дело»

Тема 2: «Методы и средства лучевой диагностики. Метод магнитно-резонансной томографии»

Время: 6 часов

Утверждены на заседании кафедры лучевой диагностики с курсом ФПКиП
(протокол №7 от 06.02.2026).

Учебная цель:

- формирование у студентов профессиональных компетенций, необходимых для решения диагностических задач путем применения метода МРТ при заболеваниях разных органов и систем;
- формирование у студентов знаний о лучевой семиотике наиболее распространенных заболеваний человека и принципах органно-комплексного применения метода МРТ;
- уметь проводить базовую сердечно-легочную реанимацию и иные реанимационные мероприятия в случае возникновения осложнений при применении контрастных веществ.

Воспитательная цель:

- развить свой ценностно-личностный, духовный потенциал, сформировать качества патриота и гражданина, готового к активному участию в экономической, производственной, социально-культурной и общественной жизни страны;
- научить соблюдать учебную и трудовую дисциплину, этико-деонтологические нормы и правила в диагностическом процессе;
- уметь применять основные модели взаимодействия врача и пациента;

Задачи практического занятия:

- 1. Организация работы кабинета магнитно-резонансной томографии (МРТ)**
Изучить планировку, функциональные зоны, логику потоков пациентов и персонала, а также особенности эксплуатации оборудования в условиях МРТ-кабинета.
- 2. Меры охраны труда при работе с МРТ**
Ознакомиться с требованиями безопасности, связанными с воздействием сильного магнитного поля, радиочастотного излучения и акустического шума, а также с правилами поведения персонала в зоне сканирования.
- 3. Устройство аппарата МРТ**
Изучить структурную схему томографа: основной магнит, градиентные катушки, радиочастотная система, стол пациента и компьютерная система обработки данных.
- 4. Противопоказания к проведению МРТ**
Рассмотреть абсолютные и относительные противопоказания, включая наличие кардиостимуляторов, ферромагнитных имплантов, металлических инородных тел, а также клинические ограничения (клаустрофобия, первый триместр беременности и др.).
- 5. Получение и анализ МР-изображений**
Освоить принципы формирования магнитно-резонансного сигнала и научиться интерпретировать базовые изображения: определять анатомическую область исследования и различать ткани по интенсивности сигнала (гипо-, изо- и гиперинтенсивные структуры).
- 6. T1- и T2-взвешенные изображения**
Ознакомиться с физическими основами и диагностическим значением основных типов взвешенности изображений — T1- и T2-взвешенных

последовательностей.

7. Сохранение и работа с цифровыми данными МРТ

Научиться записывать результаты исследования на электронные носители (CD/DVD/флеш-накопители) и открывать их с использованием стандартного программного обеспечения для просмотра DICOM-файлов.

8. Основные импульсные последовательности в МРТ

Изучить наиболее часто применяемые режимы сканирования: SE (spin-echo), FSE/TSE, GRE, FLAIR, DWI, STIR и др., а также их диагностическое назначение.

9. Контрастирование в МРТ

Ознакомиться с методами применения парамагнитных контрастных препаратов (на основе гадолиния) для улучшения визуализации патологических очагов, а также с показаниями и особенностями их использования.

10. Первая помощь при реакциях на МР-контраст

Изучить алгоритмы распознавания и оказания неотложной помощи при местных и системных побочных реакциях на введение контрастного вещества, включая анафилактические состояния.

11. Показания к проведению МРТ

Ознакомиться с основными клиническими ситуациями, при которых МРТ является методом выбора: заболевания ЦНС, опорно-двигательного аппарата, органов малого таза, брюшной полости, мягких тканей и др.

В результате проведения учебного занятия студент должен знать:

- ~ лучевую анатомию и лучевую семиотику наиболее распространенных заболеваний человека;
- ~ принципы органно-комплексного применения МРТ, КТ и других рентгенологических методов лучевой диагностики;
- ~ реакции и осложнения при применении контрастных веществ, а также меры по предотвращению и лечению местных/системных реакций и осложнений.

уметь:

- ~ определять показания и противопоказания к МРТ исследованию при наиболее распространенных заболеваниях человека;
- ~ подготавливать пациента к МРТ исследованию при основных распространенных заболеваниях;
- ~ интерпретировать результаты МРТ исследования;
- ~ оказать первую помощь при острых побочных реакциях на введение контрастных веществ

владеть:

- ~ навыками выбора МРТ, КТ или других рентгенологических методов визуализации при разных заболеваниях;
- ~ навыками подготовки пациентов к лучевым исследованиям при наиболее частых заболеваниях;
- ~ навыками интерпретации результатов МРТ исследования и, при необходимости, построения схемы дообследования при основных распространенных заболеваниях;

~ навыками оказания первой помощи при возникновении острых побочных реакций на введение контрастных веществ.

Мотивация для усвоения темы: рейтинговая система оценки знаний

МАТЕРИАЛЬНОЕ ОСНАЩЕНИЕ

Диски с записью МРТ исследований, электронные средства демонстрации иллюстративного материала (интерактивная доска, телевизор, проектор), ультразвуковые сканеры.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ИЗ СМЕЖНЫХ ДИСЦИПЛИН

«Анатомия человека»:

- нормальная анатомия
- половые и возрастные особенности

Контрольные вопросы:

1. Физические основы метода: что такое ядерно-магнитный резонанс (ЯМР) и суть его применения в медицинской визуализации
2. История развития МРТ: ключевые этапы от открытия ЯМР до внедрения в клиническую практику; роль лауреатов Нобелевской премии и технологических прорывов
3. Принцип формирования МР-изображения: взаимодействие протонов с магнитным полем, радиочастотные импульсы, релаксация (T1 и T2), регистрация сигнала и реконструкция изображения
4. Типы МР-томографов: классификация по типу магнита (сверхпроводящие, постоянные, резистивные), напряжённость магнитного поля (низко-, средне- и высокопольные системы), открытые и закрытые конструкции
5. Организация работы кабинета МРТ: структура подразделения, требования к помещению (зоны безопасности), роль медицинского персонала, алгоритмы подготовки пациента
6. Основные импульсные последовательности в МРТ: понятие о T1- и T2-взвешенных изображениях, их диагностическое значение, особенности визуализации тканей на разных режимах (включая STIR, FLAIR, DWI)
7. Сравнительные преимущества МРТ: отсутствие ионизирующего излучения, высокая контрастность мягких тканей, возможность многосрезового и мультипланарного сканирования — в сравнении с рентгенографией и КТ
8. Клинические показания к выполнению МРТ: нейровизуализация, опорно-двигательный аппарат, органы брюшной полости и малого таза, сердце и сосуды. Показания к применению контрастных препаратов на основе гадолиния (оценка васкуляризации, воспаления, опухолей)
9. Абсолютные и относительные противопоказания к МРТ: наличие ферромагнитных имплантов, кардиостимуляторов, инородных тел глаза, клаустрофобия, беременность (I триместр), аллергия на контрастные средства

Литература

Основная:

1. Илясова, Е. Б. Лучевая диагностика: учебное пособие / Е. Б. Илясова, М. Л. Чехонацкая, В. Н. Приезжева. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва: ГЭОТАР-Медиа, 2021. – 432 с.
2. Трутень, В. П. Рентгенология: учебное пособие / В. П. Трутень. – Москва: ГЭОТАР-Медиа, 2021. – 336 с.
3. Труфанов, Г. Е. Лучевая диагностика: учебник / Труфанов Г. Е. и др. – Москва: ГЭОТАР-Медиа, 2018. – 484 с.
4. Лучевая диагностика и лучевая терапия: учебн. пособие / [А.И. Алешкевич [и др.]] – Минск : Новое знание, 2017. – 381 с.
5. Ермолицкий, Н. М. Радиационная безопасность в лучевой диагностике: учеб.-метод. пособие для студентов 3-5 курсов мед.-диагност. фак. мед. вузов / Н. М. Ермолицкий; УО «ГомГМУ», Каф. внутренних болезней № 3 с курсом лучевой диагностики и лучевой терапии. – Гомель: ГомГМУ, 2018. – 97 с.

Дополнительная:

6. Власов, Е. А. Томографическая (КТ и МРТ) анатомия центральной нервной системы человека [Атлас] / Е. А. Власов. – Москва : Издательский дом Видар-М, 2020. – 144 с.
7. (8). Жерко, О. М. Клиническая трансторакальная эхокардиография: практическое руководство для врачей / О. М. Жерко. – Минск : Альфа-книга, 2020. – 832с.
8. (9). Жерко, О. М. Ультразвуковая диагностика патологии сосудов: практическое руководство для врачей / О. М. Жерко. – Минск : Альфа-книга, 2019. – 688 с.
9. (10). Кармазановский, Г. Г. Динамическая мультиспиральная КТ: параметры и характеристики болюса контрастного вещества, примерные протоколы сканирования и их клиническое применение. Руководство для врачей лучевых диагностов / Г. Г. Кармазановский. – Москва : Издательский дом Видар-М, 2020. – 384 с.
10. (11). Морозов, С. П. Основы менеджмента медицинской визуализации / Морозов С. П. [и др.] – Москва : ГЭОТАР-Медиа, 2020. – 432 с.
11. (13). Носенко, Е. М. Ультразвуковое исследование артерий и вен верхних конечностей / Е. М. Носенко, Н. С. Носенко, Л. В. Дадова. – Москва : Издательский дом Видар-М, 2020. – 240 с.
12. (14). Озерская, И. А. Руководство по ультразвуковой диагностике в акушерстве и гинекологии / И. А. Озерская. – Москва : МЕДпресс-информ, 2021. – 304 с.

ДИДАКТИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ

Содержание учебного материала

Структурная схема и основные элементы магнитно-резонансных томографов. Качество изображения: толщина слоя, ориентация слоя, пространственное и контрастное разрешение. Понятие отношения сигнал/шум. Изображения, взвешенные по T1, T2 и по протонной плотности.

Выбор параметров исследования: TR, TE, T1, число усреднений сигнала, угол наклона вектора (flip angle), поле обзора (FOV), размер матрицы, число срезов, толщина слоя и расстояние между слоями, время сканирования и факторы, влияющие на него. Мультипланарное и трехмерное преобразование изображений.

Побочные эффекты воздействия постоянного магнитного, переменного градиентного и радиочастотного полей на организм человека. Специфические противопоказания к магнитно-резонансной томографии (МРТ). Меры безопасности для пациентов и персонала.

Контрастирование при МРТ, показания и противопоказания. Виды контрастных веществ, их дозирование, способы введения. Реакции и осложнения при применении контрастных препаратов. Меры по предотвращению и лечению реакций и осложнений.

Магнитно-резонансная спектроскопия (МР-спектроскопии). Ядерно-магнитный спектрометр. Лаборатория МР-спектроскопии. Клиническая МР-спектроскопия.

Инструктаж и подготовка пациента к исследованию. Укладка пациента. Премедикация пациента. Протокол исследования головного мозга, протокол исследования орбит. Протокол исследования позвоночника (шейный, грудной и поясничный отдел). Протокол исследования грудной клетки. Протокол исследования молочных желез. Протокол исследования брюшной полости. Протокол исследования малого таза. Протокол исследования сердца.

История развития магнитно-резонансной томографии (МРТ)

1946 год стал отправной точкой: независимо друг от друга **Феликс Блох** из Стэнфордского университета и **Эдвард Парселл** из Гарварда открыли явление **ядерного магнитного резонанса (ЯМР)** — способность атомных ядер поглощать и излучать радиочастотную энергию в магнитном поле. За это открытие они получили **Нобелевскую премию по физике в 1952** году.

Уже в **1960** году советский инженер **Владислав Александрович Иванов** из Ленинградского института точной механики и оптики подал заявку в Комитет по делам изобретений с описанием принципов получения внутренних изображений объектов с помощью ЯМР — по сути, предложив концепцию **магнитно-резонансной томографии**. Однако официальное авторское свидетельство № 1112266 ему выдали лишь в **1984** году, сохранив приоритет даты подачи.

В **1971** году американский учёный **Реймонд Дамадьян**, работавший в Гарварде, обнаружил, что **опухолевые и здоровые ткани по-разному реагируют на ЯМР**, и предложил использовать это явление для **ранней диагностики рака**. Через три года, в **1974** году, он получил **первый патент на применение МРТ в медицинской диагностике**, а в **1988** году был удостоен **Национальной медали США в области технологий**. Интересно, что Дамадьян, несмотря на свой вклад в практическое применение МРТ, в список лауреатов

на Нобелевскую премию не вошёл, что вызвало споры в научном сообществе. В **2001** году он был удостоен престижной **премии Lemelson-MIT** как «человек, изобретший сканер МРТ», а его первый томограф полного тела сегодня хранится в **Национальном музее славы изобретателей** в Акроне (Огайо, США).

Прорыв в создании реальных изображений произошёл в **1973** году, когда **Пол Лаутербур** (Нью-Йоркский университет в Стоуни-Брук) опубликовал в журнале *Nature* статью, в которой предложил использовать **градиенты магнитного поля** для пространственной локализации сигнала ЯМР и построения изображений. Позже **Питер Мэнсфилд** (Ноттингемский университет) разработал **математические методы и алгоритмы**, позволившие значительно ускорить получение изображений.

В **2003** году Лаутербур и Мэнсфилд получили **Нобелевскую премию по физиологии и медицине** «за изобретение метода магнитно-резонансной томографии».

Магнитно-резонансная томография (МРТ) — томографический метод исследования внутренних органов и тканей с использованием физического явления ядерного магнитного резонанса — метод основан на измерении электромагнитного отклика ядер атомов водорода на возбуждение их определённой комбинацией электромагнитных волн в постоянном магнитном поле высокой напряжённости.

Основные этапы и принципы работы МРТ:

1. Помещение пациента в сильное магнитное поле
2. Воздействие радиочастотным импульсом
3. Релаксация и регистрация сигнала
4. Пространственная локализация сигнала (градиенты)
5. Реконструкция изображения

Протон (^1H , а не H_2 — это ядро атома водорода) представляет собой квантовую систему, обладающую спином и, как следствие, собственным магнитным моментом, аналогичным магнитному диполю. В отсутствие внешнего магнитного поля магнитные моменты протонов ориентированы хаотично.

При помещении тела в сильное однородное статическое магнитное поле (B_0) протоны начинают совершать прецессионное движение вокруг направления поля с характерной ларморовой частотой, определяемой уравнением:

$$\omega_0 = \gamma B_0,$$

где γ — гиромагнитное отношение (для протона ≈ 42.58 МГц/Тл).

В результате действия поля большинство протонов частично выравнивается вдоль силовых линий B_0 , формируя результирующую продольную намагниченность (вдоль оси z).

При подаче *радиочастотного (РЧ) импульса* с частотой, *резонансной ларморовой*, энергия передаётся протонам, и их магнитные моменты «опрокидываются» в поперечную плоскость (ху-плоскость). При этом продольная намагниченность уменьшается (в идеальном случае — до нуля при

90°-импульсе), а появляется поперечная намагниченность

После прекращения РЧ-импульса система возвращается в равновесное состояние:

- протоны релаксируют к исходной ориентации вдоль B_0 (восстанавливается продольная намагниченность — *T1-релаксация*),

- одновременно происходит декогеренция фаз поперечных магнитных моментов, и поперечная намагниченность затухает (*T2-релаксация*).

В ходе этого процесса протоны излучают радиочастотную энергию, которая регистрируется приёмной катушкой томографа в виде так называемого эха сигнала. Именно этот сигнал служит основой для формирования МР-изображения.

После прекращения радиочастотного (РЧ) импульса возбуждённые протоны возвращаются в более низкое энергетическое (равновесное) состояние, высвобождая избыточную энергию в виде радиочастотного сигнала. Этот процесс возвращения к равновесию называется **релаксацией**.

Релаксация включает два независимых, но одновременно протекающих процесса:

1.Продольная (T1-) релаксация, или спин-решёточная релаксация — это восстановление продольной намагниченности (вдоль основного магнитного поля B_0).

Время T1 определяется как интервал, за который продольная намагниченность достигает 63 % от своего максимального равновесного значения.

Скорость T1-релаксации зависит от локального микроскопического окружения протонов: характера химических связей, подвижности молекул, взаимодействия со структурой окружающей среды («решёткой»), а также от эффективности передачи энергии от спинов в окружающую среду.

2.Поперечная (T2-) релаксация, или спин-спиновая релаксация — это затухание поперечной намагниченности (в плоскости, перпендикулярной B_0). После РЧ-импульса (например, 90°) все протоны изначально прецессируют синхронно, в одной фазе. Однако из-за малых неоднородностей магнитного поля и локальных магнитных взаимодействий между спинами, их фазы постепенно расходятся (происходит дефазировка).

Время T2 — это промежуток, за который поперечная намагниченность уменьшается до 37 % от своего начального значения.

Таким образом, *T1 отражает восстановление энергии, а T2 — потерю когерентности фазы между спинами.*

Основы формирования контраста в магнитно-резонансной томографии

В магнитно-резонансной томографии (МРТ) сигнал от каждой точки исследуемого объёма регистрируется многократно. В зависимости от времени начала регистрации сигнала — определяемого типом **импульсной последовательности** — формируются изображения с различной **тканевой взвешенностью**: **T1-взвешенные (T1-ВИ), T2-взвешенные (T2-ВИ) и протон-взвешенные (PD-ВИ).**

Импульсные последовательности представляют собой строго заданные комбинации радиочастотных (РЧ) импульсов и магнитных градиентов.

Благодаря их вариабельности достигается дифференцированная контрастность

между мягкоткаными структурами, что лежит в основе диагностической ценности МРТ и позволяет реализовывать специализированные методики (например, диффузионно-взвешенную, перфузионную или спектроскопическую визуализацию).

Основные типы взвешенных изображений:

- **T1-ВИ** — обеспечивают высокую **анатомическую детализацию** за счёт чёткого разграничения тканей с различным временем продольной (T1) релаксации.
- **T2-ВИ** — оптимальны для выявления **патологических изменений**, поскольку большинство патологических процессов сопровождается увеличением содержания свободной воды в тканях.

Амплитуда МР-сигнала определяется совокупностью факторов:

- протонной плотностью (концентрацией подвижных ядер ^1H),
- временами релаксации T1 (спин-решёточной) и T2 (спин-спиновой),
- диффузионными свойствами тканей,
- скоростью и характером кровотока,
- химическим составом (наличие жира, воды, белков),
- температурой объекта,
- микроструктурой молекулярного окружения (степенью «связанности» воды).

Ключевыми параметрами, определяющими тип взвешенности, являются:

- **Время повторения (TR, repetition time)** — интервал между последовательными возбуждающими РЧ-импульсами. В спин-эхо (SE) последовательности TR измеряется между двумя 90° импульсами, в градиент-эхо (GRE) — между α -импульсами, в инверсионно-восстановительных (IR) — между 180° импульсами. TR определяет степень восстановления **продольной намагниченности** и, следовательно, влияет на вклад T1-релаксации в формирование сигнала.
- **Время эха (TE, echo time)** — интервал между возбуждающим РЧ-импульсом и моментом регистрации пика эхо-сигнала в приёмной катушке (в мс). TE определяет степень затухания **поперечной намагниченности** и тем самым контролирует влияние T2-релаксации на контраст.

Типичные параметры для базовых последовательностей:

- **T1-ВИ**: короткое TR (300–800 мс) и короткое TE (10–20 мс).
- **T2-ВИ**: длинное TR (>2000 мс) и длинное TE (>80 мс).
- Угол переворота (flip angle) оказывает наибольшее влияние в градиент-эхо последовательностях; в T1-ВИ он может использоваться для тонкой настройки контраста, тогда как в T2-ВИ его роль менее значима.

Особенности сигнала при патологии и в нормальных тканях:

При большинстве патологических процессов (воспаление, отёк, опухоль, ишемия) **увеличивается содержание свободной воды**, что приводит к:

- **снижению интенсивности сигнала на T1-ВИ** (гипоинтенсивность),
- **повышению интенсивности на T2-ВИ** (гиперинтенсивность).

Жировая ткань характеризуется коротким T1 и относительно длинным T2, поэтому даёт **гиперинтенсивный сигнал как на T1-, так и на T2-ВИ** (выглядит «белой»).

Спинномозговая жидкость, несмотря на высокое содержание воды, имеет **очень длинное T2**, поэтому на T2-ВИ она также **гиперинтенсивна**. Однако из-за крайне длинного T1 она выглядит **гипоинтенсивной на T1-ВИ**.

Ткань / структура	T1-ВИ	T2-ВИ	Примечание
Костный мозг	Гиперинтенсивный	Изо- или гиперинтенсивный	Содержит жир → яркий на T1; на T2 — обычно ярче или как мышца
Мышцы	Изоинтенсивные	Изоинтенсивные (гипоинтенсивнее, чем на T1)	На T2 чуть темнее, чем на T1; служат ориентиром для сравнения
Кровь	Гипоинтенсивная	Гиперинтенсивная (в просвете сосуда)	В остром периоде (деоксигемоглобин/метгемоглобин) — сигнал может варьировать
Белое вещество	Гиперинтенсивное	Гипоинтенсивное	Быстрее релаксирует по T1 благодаря миелину
Серое вещество	Гипоинтенсивное	Гиперинтенсивное	Содержит больше воды → темнее на T1, светлее на T2, чем белое вещество
Жидкости (ликвор, кисты, отёк)	Гипоинтенсивные	Гиперинтенсивные	Высокое содержание свободной воды → очень тёмные на T1, очень яркие на T2
Кости (кортикальный слой)	Гипоинтенсивные	Гипоинтенсивные	Мало подвижных протонов → слабый или отсутствующий сигнал
Жир	Гиперинтенсивный	Гиперинтенсивный (но ≈ гипоинтенсивнее, чем на T1)	Яркий на обоих, но на T1 — ярче, чем на T2
Воздух	Гипоинтенсивный (сигнал отсутствует)	Гипоинтенсивный (сигнал отсутствует)	Нет протонов → чёрный на всех последовательностях

* Условные обозначения интенсивности сигнала:

Гиперинтенсивный — яркий (белый/светлый)

Изоинтенсивный — такой же, как мышца (серый)

Гипоинтенсивный — тёмный (серый/чёрный)

Единица измерения магнитного поля: тесла (Тл)

В магнитно-резонансной томографии (МРТ) основное магнитное поле (обозначаемое как B_0) измеряется в теслах (Тл) — единице магнитной индукции в Международной системе единиц (СИ). Названа в честь выдающегося физика и инженера Николы Теслы.

Один тесла определяется как такая индукция магнитного поля, при которой на проводник длиной 1 метр, по которому течёт ток силой 1 ампер и который расположен перпендикулярно полю, действует сила в 1 ньютон.

На практике в МРТ чаще используют доли теслы:

- 1 Тл = 1000 миллитесла (мТл)
- 1 мТл = 1000 микротесла (мкТл)

В зависимости от индукции основного магнитного поля (B_0) магнитно-резонансные томографы условно делят на следующие группы:

Сверхнизкопольные: до 0,1 Тл

Низкопольные: 0,1–0,5 Тл

Среднепольные: 0,5–1,0 Тл

Высокопольные: 1,0–2,0 Тл

Сверхвысокопольные: свыше 2,0 Тл

Типы магнитных систем, используемых для создания основного поля:

Постоянные магниты — изготавливаются из ферромагнитных материалов.

Обеспечивают стабильное поле, но имеют значительную массу и ограничены по индукции (обычно до 0,3 Тл). Чаще применяются в низкопольных системах.

Резистивные электромагниты — представляют собой соленоиды, по обмоткам которых пропускается электрический ток. Позволяют достичь индукции 0,3–0,7 Тл, однако требуют постоянного энергопотребления и эффективного охлаждения из-за выделения тепла.

Гибридные магниты — комбинируют элементы постоянных и резистивных систем, что позволяет частично компенсировать недостатки каждого типа.

Сверхпроводящие магниты — наиболее распространённый тип в клинической практике (особенно в высокопольных и сверхвысокопольных томографах).

Обмотки из сверхпроводящих материалов (например, ниобий-титан) охлаждаются до криогенных температур (обычно с помощью жидкого гелия, $\approx 4,2$ К), что позволяет поддерживать ток без сопротивления и создавать стабильное поле высокой индукции (1,5–7 Тл и выше). Требуют многоступенчатых систем охлаждения и герметичной криостатической изоляции.

Противопоказания к проведению МРТ

Магнитно-резонансная томография считается безопасным методом визуализации, не использующим ионизирующее излучение. Однако из-за сильного статического магнитного поля, градиентных импульсов и радиочастотного излучения существуют абсолютные и относительные противопоказания, которые необходимо учитывать перед исследованием.

Абсолютные противопоказания

- Кардиостимуляторы (электрокардиостимуляторы) и другие имплантируемые электронные устройства, не сертифицированные как «МР-совместимые» (включая имплантируемые кардиовертеры-дефибрилляторы — ИКД).
- Ферромагнитные клипсы и скобы на церебральных или других крупных сосудах (риск смещения и кровоизлияния).
- Ферромагнитные инородные тела в жизненно важных зонах (например, в глазнице или спинном мозге).
- Электронные имплантаты среднего и внутреннего уха (кохлеарные имплантаты, нейростимуляторы слухового нерва), если они не имеют маркировки MR-conditional.
- Инсулиновые помпы, нейростимуляторы и другие активные имплантируемые устройства, не совместимые с МРТ.

Примечание: с развитием технологий многие современные импланты становятся МР-совместимыми («MR-safe» или «MR-conditional»). В таких случаях проведение МРТ возможно при соблюдении указанных условий (например, определённая напряжённость поля, время после имплантации и др.).

Относительные противопоказания

- Металлические скобы на груди после кардиохирургических операций (большинство современных скоб — титановые и не ферромагнитные).
- Сосудистые стенты, кава-фильтры, эмболизационные спирали и другие эндоваскулярные устройства, имплантированные более 6–8 недель назад (обычно уже прочно фиксированы в стенке сосуда).
- Искусственные сердечные клапаны (подавляющее большинство современных моделей безопасны при МРТ).
- Беременность в I триместре — не является строгим противопоказанием, но МРТ проводится только по жизненным показаниям и без контрастирования (в отсутствие данных о полном отсутствии риска для плода).
- Тяжёлое общее состояние пациента, требующее постоянного мониторинга или использования реанимационной аппаратуры (если оборудование не МР-совместимое).
- Клаустрофобия — может быть преодолена седацией, использованием открытых МРТ-систем или психологической подготовкой.
- Невозможность сохранять неподвижность (например, у маленьких детей, пациентов с двигательными расстройствами) — может потребовать медикаментозной седации или наркоза.

Преимущества магнитно-резонансной томографии (МРТ)

МРТ обладает рядом уникальных диагностических преимуществ, обусловленных физическими принципами метода:

1. Высокий тканевой контраст

В отличие от компьютерной томографии, контраст в МРТ не зависит от физической плотности тканей, а определяется их физико-химическими свойствами: временами релаксации (T1 и T2), протонной плотностью, диффузией, перфузией, химическим составом и подвижностью молекул. Это обеспечивает исключительную чувствительность к патологическим изменениям, особенно в мягких тканях.

2. Управляемый контраст изображения

Благодаря возможности варьировать параметры импульсных последовательностей (TR, TE, угол переворота и др.), врач может целенаправленно усиливать или подавлять сигнал от определённых тканей (например, жидкости, жира, крови), что повышает диагностическую точность.

3. Отсутствие артефактов от костной ткани

Компактная кость содержит мало подвижных протонов и практически не даёт сигнала, поэтому не создаёт артефактов, затрудняющих визуализацию прилегающих структур (в отличие от КТ). Это особенно ценно при исследовании головного и спинного мозга, корешков спинномозговых нервов, мягких тканей лица и шеи.

4. Мультипланарность и трёхмерная визуализация

МРТ позволяет напрямую получать изображения в любой анатомической плоскости (аксиальной, сагиттальной, фронтальной и косых) без реконструкции, а также строить объёмные (3D) модели органов и патологических очагов — что критически важно для нейрохирургии, онкологии и ортопедии.

5. Возможность неинвазивной оценки гемодинамики

С помощью специальных методик (например, фазово-контрастной МРТ или time-of-flight ангиографии) можно визуализировать кровотоки, оценивать скорость и направление движения крови, выявлять стенозы, аневризмы и артериовенозные мальформации — без введения контрастного вещества.

6. Отсутствие ионизирующего излучения

МРТ использует магнитное поле и радиочастотные импульсы, не оказывающие повреждающего воздействия на клетки. Это делает метод особенно безопасным для детей, беременных (при строгих показаниях) и пациентов, требующих повторных исследований.

Ограничения магнитно-резонансной томографии (МРТ)

Несмотря на высокую диагностическую ценность, МРТ имеет ряд существенных ограничений, которые важно учитывать при выборе метода визуализации:

Низкая чувствительность к кальцинатам и обызвествлениям

В отличие от компьютерной томографии (КТ), МРТ плохо визуализирует кальцинированные структуры, поскольку кальций не содержит подвижных протонов и практически не генерирует МР-сигнал. Это снижает эффективность метода при выявлении микрокальцинатов в молочной железе, атеросклеротических бляшек с кальцификацией, некоторых опухолей и

дегенеративных изменений костей.

Артефакты, обусловленные движениями

Длительное время сканирования делает МРТ высоко чувствительной к любым движениям пациента. Особенно выражены артефакты при исследовании органов грудной клетки и брюшной полости, где сигнал искажается из-за дыхания, перистальтики кишечника и пульсации сосудов. Для уменьшения этих эффектов применяют техники синхронизации с дыханием или ЭКГ, а также ускоренные импульсные последовательности, однако качество изображения может оставаться ниже, чем при КТ.

Противопоказания, связанные с физическими свойствами магнитного поля

- МРТ нельзя проводить пациентам с рядом имплантов и устройств, чувствительных к магнитному полю;
- Не-MR-совместимые кардиостимуляторы и другие активные имплантируемые устройства (риск остановки работы или перепрограммирования);
- Ферромагнитные инородные тела (особенно в глазнице, головном мозге, крупных сосудах — возможен их сдвиг и травматизация тканей);
- Некоторые электронные импланты (кохлеарные имплантаты, инсулиновые помпы и др.), если они не сертифицированы как безопасные для МРТ.

Ограничения при беременности и в тяжёлом состоянии

Беременность в I триместре не является абсолютным противопоказанием, но МРТ проводится только по строгим жизненным показаниям и без контрастирования, так как безопасность радиочастотного поля для раннего эмбриогенеза окончательно не доказана.

Пациенты в критическом состоянии, нуждающиеся в подключении к реанимационной аппаратуре (ИВЛ, мониторы, инфузионные насосы), часто не могут быть обследованы, поскольку большинство жизнеобеспечивающих устройств не являются MR-совместимыми и могут выйти из строя или создать угрозу для пациента под действием магнитного поля.

Контрастирование при МРТ

Гадолиний (Gd) — это редкоземельный элемент с атомным номером 64, относящийся к лантаноидам

Гадолиний относится к f-блоку Периодической таблицы и обладает рядом характеристик, обусловленных его электронной конфигурацией: $[\text{Xe}] 4f^7 5d^1 6s^2$. Он имеет семь неспаренных электронов в f-оболочке, что придаёт ему один из самых высоких среди элементов парамагнитных моментов (до 7,94 μB). Эта особенность делает гадолиний исключительно эффективным в качестве релаксационного усилителя — он воздействует на окружающие протонные спины воды и сокращает их время продольной релаксации, что приводит к увеличению яркости сигнала в области накопления препарата.

Все МР-контрастные средства — хелатные соединения гадолиния, стабилизированные лигандами для снижения токсичности свободного Gd^{3+} .

Классификация по структуре:

<i>Тип</i>	<i>Характеристика</i>	<i>Примеры</i>
------------	-----------------------	----------------

Линейные	Менее стабильные, выше риск высвобождения Gd^{3+}	Гадодиамид (Omniscan®), гадопентетат (Magnevist®)
Макроциклические	Высокая термодинамическая и кинетическая стабильность → меньше риска	Гадотерид (Dotarem®), гадобутрол (Gadovist®), гадотерол (ProHance®)

Современная рекомендация: предпочтение макроциклическим препаратам из-за их повышенной безопасности, особенно у пациентов с нарушением функции почек.

Противопоказания к применению контрастных препаратов

Абсолютные:

- *Тяжёлая гиперчувствительность (анафилаксия)* в анамнезе на гадолиний-содержащие препараты.

Относительные / осторожность требуется:

- *Хроническая болезнь почек (ХБП) с СКФ < 30 мл/мин/1,73м²* (включая пациентов на диализе) — риск развития *нефрогенного системного фиброза (НСФ)*.
→ В таких случаях:
 - Использовать **только макроциклические** препараты (низкий риск НСФ),
 - Минимизировать дозу,
 - Проконсультироваться с нефрологом,
 - При необходимости — провести диализ **в течение 24 часов** после введения.
- *Беременность* — **контраст не рекомендован**, особенно в I триместре (гадолиний проникает через плаценту; данные о безопасности ограничены).
- *Грудное вскармливание* — по современным рекомендациям (ACR, ESR), **прекращать кормление не требуется** (менее 0,04% дозы выделяется с молоком; абсорбция у ребёнка — пренебрежимо мала).

Меры профилактики при контрастировании

- Тщательный сбор анамнеза (аллергия, почечная функция, беременность);
- Оценка СКФ перед контрастированием у пациентов с факторами риска (сахарный диабет, гипертония, возраст >60 лет);
- Использование макроциклических препаратов у групп риска;
- Применение минимально необходимой дозы.

Показания к применению магнитно-резонансной томографии (МРТ)*

МРТ является методом выбора при необходимости детальной визуализации мягких тканей, центральной нервной системы, сосудистых структур и внутренних органов. Основные клинические показания по локализациям:

1. Головной мозг

- МРТ — золотой стандарт нейровизуализации. Показания включают:
- Диагностика патологий базальных ганглиев и глубинных структур мозга (например, при нейродегенеративных заболеваниях);
- Оценка поражений задней черепной ямки (мозжечок, ствол мозга), где КТ ограничена из-за артефактов от костей черепа;

- Исследование продолговатого мозга при подозрении на демиелинизацию, ишемию или сирингобульбию;
- Выявление и мониторинг демиелинизирующих заболеваний (рассеянный склероз, острый рассеянный энцефаломиелит);
- Диагностика опухолей гипофиза (аденомы, краниофарингиомы) и оценка их распространения на турецкое седло и зрительные пути;
- Выявление рецидивов внутричерепных опухолей после хирургического лечения или лучевой терапии;
- Исследование при неврологической симптоматике при отсутствии изменений на КТ — МРТ обладает значительно более высокой чувствительностью к ранним и субтильным поражениям (например, ишемия в стволе мозга, энцефалит, малые опухоли).

2. Позвоночник и спинной мозг

- МРТ — основной метод визуализации спинного мозга, нервных корешков и паравертебральных структур;
- Диагностика интрамедуллярных и экстрамедуллярных опухолей спинного мозга (астрцитомы, эпендимомы, менингиомы, невриномы);
- Выявление сирингомиелии (кистозных полостей в спинном мозге) и её причин (например, аномалия Киари);
- Оценка рецидивов межпозвонковых грыж после операции (дифференцировка от постоперационного рубца);
- Диагностика неврином (чаще в межпозвонковых отверстиях) и других периферических нервных оболочечных опухолей;
- Оценка послеоперационных изменений: фиброз, спаечный процесс, нестабильность;
- Выявление опухолевого поражения позвоночника (метастазы, миелома, лимфома)
- Исследование при стойкой неврологической симптоматике при нормальной КТ (например, компрессия корешка на фоне умеренного стеноза).

3. Органы грудной клетки и сердечно-сосудистая система

- МРТ грудной клетки и кардиальная МРТ применяются при необходимости мягкотканевой и функциональной оценки:
- Оценка локальной инвазии опухолей лёгких и плевры в грудную стенку, средостение, диафрагму и крупные сосуды (аорту, верхнюю полую вену);
- Диагностика и мониторинг аневризм и расслоений аорты, особенно у пациентов, которым необходимо избегать ионизирующего излучения;
- Выявление перикардиальных патологий: утолщение перикарда, экссудативный перикардит, констриктивный перикардит;
- Визуализация внутрисердечных образований (тромбы, опухоли — миксомы, саркомы) и паракардиальных масс;
- Диагностика осложнений острого инфаркта миокарда: истинные и ложные аневризмы, внутрисердечные тромбы, разрывы стенки;
- Оценка аритмогенной дисплазии правого желудочка (АДПЖ) — метод выбора при подозрении на это заболевание;
- Исследование при желудочковых тахикардиях, связанных с патологией выносящего тракта правого желудочка;
- Диагностика врождённых пороков:

- коарктация аорты,
- аномалии дуги аорты (двойная дуга, ретрокавальное расположение),
- аномалии лёгочных вен (частичный или полный аномальный дренаж);
- Комплексная оценка кардиомиопатий (гипертрофическая, дилатационная, инфильтративная — например, при амилоидозе), включая фиброз миокарда (с контрастированием по методике LGE — late gadolinium enhancement).

* Прим: Исследование должно быть обоснованным, клинически целесообразным и обеспечивать диагностическую информацию, недоступную при использовании других методов визуализации. Более детальное рассмотрение показаний будет проведено в соответствующих темах.