

А.С. Лагутин, Г.Ю. Григорьев

**ПРОБЛЕМЫ БЕЗОПАСНОСТИ В МАГНИТНО-РЕЗОНАНСНОЙ ТОМОГРАФИИ:  
КРАТКИЙ ОБЗОР**

Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва

Контактное лицо: Александр Сергеевич Лагутин, e-mail: Lagutin\_AS@nrcki.ru

**РЕФЕРАТ**

**Цель:** В XXI веке отчетливо проявилась тенденция к переходу от магнитно-резонансных томографов (МРТ) с полями 0,3–0,6 Тл к сканерам с сильными полями (1–3 Тл), а в его втором десятилетии – к МРТ со сверхвысокими полями (7 Тл и более). Данная работа представляет собой актуализированный обзор исследований, затрагивающих проблемы безопасности при МРТ в сильных и сверхсильных магнитных полях.

**Материал и методы:** Поиск литературы для последующего анализа проведен путем сопоставления заголовков медицинских тем с использованием рубрикатора MeSH базы данных PubMed. Затем был осуществлен поиск по этой базе данных и базовой коллекции Web of Science (Clarivate Analytics) за период с 2000 г. по апрель 2025 г. Дополнительно с помощью поисковых механизмов Google и Yandex отобраны публикации по проблемам безопасности МРТ, а также изучены работы, связанные с будущим магнитно-резонансной томографии.

**Результаты:** Проанализированы обзорные статьи и оригинальные исследовательские работы, в которых обсуждались разные аспекты безопасности МРТ процедур. Публикации, цитируемые в статье, представляют собой исследования, посвященные применению магнитно-резонансной томографии как в медицинских, так и в научных целях. Проведена актуализация требований электромагнитной безопасности при МРТ с учетом современных отечественных и зарубежных регламентирующих документов.

**Заключение:** Представлен обзор результатов исследований, касающихся проблем безопасности при воздействии на человека статических магнитных полей, радиочастотных полей и изменяющихся во времени градиентов магнитного поля в МРТ-сканерах. Научная литература обобщена и критически проанализирована с помощью обзоров признанных экспертов, а также отечественных и международных регламентов по безопасности МРТ. Основываясь на данных литературы, можно сказать, что безопасное применение магнитно-резонансных методик в магнитных полях до 7 Тл включительно подтверждено успешной клинической практикой использования МРТ-сканеров в последнее десятилетие.

**Ключевые слова:** магнитно-резонансная томография, сильные магнитные поля, градиенты поля, электромагнитное излучение, биоэффекты, безопасность МРТ исследований

**Для цитирования:** Лагутин А.С., Григорьев Г.Ю. Проблемы безопасности в магнитно-резонансной томографии: краткий обзор // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2025. Т. 70. № 6. С. 45–53. DOI:10.33266/1024-6177-2025-70-6-45-53

A.S. Lagutin, G.Y. Grigoriev

**Safety Issues in Magnetic Resonance Imaging: a Brief Overview**

National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia

Contact person: A.S. Lagutin, e-mail: Lagutin\_AS@nrcki.ru

**ABSTRACT**

**Purpose:** In the 21st century, there has been a clear trend towards the transition from 0.3–0.6 T magnetic resonance imaging (MRI) to strong-field (1–3 T) scanners, and in its second decade, to ultra-high-field MRI (7 T and more). This work provides an updated review of research addressing the safety concerns associated with MRI in strong and ultra-strong magnetic fields.

**Material and methods:** The literature search for subsequent analysis was conducted by matching the titles of medical topics using the MeSH rubricator of the PubMed database. Then, a search was performed on this database and the Web of Science Core Collection (Clarivate Analytics) for the period from 2000 to April 2025. Additionally, publications on MRI safety issues were selected using Google and Yandex search engines, and works related to the future of magnetic resonance imaging were examined.

**Results:** Review articles and original research papers were analyzed, which discussed various aspects of the safety of MRI procedures. The publications cited in the article are research papers devoted to the applications of magnetic resonance imaging for both medical and scientific purposes. The requirements of electromagnetic safety in MRI were updated, taking into account modern domestic and foreign regulatory documents.

**Conclusion:** This article provides an overview of research results related to the safety issues associated with static magnetic fields, radio frequency fields, and time-varying magnetic field gradients in MRI scanners. The scientific literature has been summarized and critically analyzed using reviews by recognized experts, as well as domestic and international regulations on MRI safety. Based on the literature data, it can be said that the safe use of magnetic resonance techniques in magnetic fields up to and including 7 T has been confirmed by the successful clinical practice of using MRI scanners over the past decade.

**Keywords:** magnetic resonance imaging, strong magnetic fields, field gradients, electromagnetic radiation, bioeffects, safety of MRI examinations

**For citation:** Lagutin AS, Grigoriev GY. Safety Issues in Magnetic Resonance Imaging: a Brief Overview. Medical Radiology and Radiation Safety. 2025;70(6):45–53. (In Russian). DOI:10.33266/1024-6177-2025-70-6-45-53

## Введение

Магнитно-резонансная томография (МРТ) является мощным методом медицинской диагностики благодаря высокой информативности и биобезопасности такого рода исследований. Для повышения информативности исследования постоянно вводятся технические усовершенствования, разрабатываются импульсные программы и методы обработки данных, позволяющие обеспечить наилучшую визуализацию изучаемых структур с учетом диагностических задач [1, 2].

Пациенты, проходящие диагностическое обследование с помощью магнитно-резонансной томографии, подвергаются неионизирующему воздействию как постоянных, так и переменных электромагнитных полей [3, 4]. МРТ в целом является безопасным методом, хотя травмы могут возникнуть в результате несоблюдения правил безопасности или человеческого фактора.

В ходе процедуры МРТ используются электромагнитные поля трех типов [5]:

- Статическое магнитное поле  $B_0$ , формирующее суммарный вектор намагниченности в тканях тела человека;
- Градиентные магнитные поля, обеспечивающие пространственное кодирование частот прецессии ядерных магнитных моментов. Это позволяет реконструировать трехмерные МРТ-изображения.
- Радиочастотный электромагнитный импульс на несущей частоте, соответствующей резонансной частоте Лармора для магнитных моментов ядер. Переменное магнитное поле этого импульса ( $B_1$ ) поворачивает вектор намагниченности в направлении, перпендикулярном полю  $B_0$ . По завершении этого импульса вектор намагниченности возвращается в состояние равновесия – это явление называется ядерным магнитным резонансом (ЯМР). Возврат намагниченности в исходное состояние обуславливает существование двух основных параметров визуализации: времен продольной ( $T_1$ ) и поперечной ( $T_2$ ) релаксации, которые напрямую связаны с контрастностью изображения при МРТ.

Эти три поля являются основными характеристиками МРТ, и каждое из них взаимодействует с электромагнитными свойствами биологических тканей [5–7]. Наряду с этими факторами не меньшее значение с точки зрения безопасности применения магнитно-резонансного сканера имеют шум при его работе, ограничения по имплантатам и прочие биоэффекты [6, 8, 9]. Биологическое воздействие магнитных полей тесно связано с частотой и интенсивностью воздействия, полом, возрастом, общим состоянием здоровья и функциональной активностью человека [3, 6].

Основные актуальные на 2025 г. документы, регламентирующие безопасное применение МРТ, перечислены ниже. Европейская директива 2013/35/EU [10] охватывает все известные прямые биофизические и косвенные эффекты, вызванные электромагнитными полями. В статье 10 этой директивы указывается, что пределы воздействия электромагнитных полей на человека могут быть превышены во время установки, тестирования, использования, разработки, технического обслуживания или исследований, связанных с оборудованием для магнитно-резонансной томографии при соблюдении определенных условий. Детальный регламент проведения МРТ исследований, включая требования безопасности пациентов и медицинского персонала, описан в международном стандарте [11].

Вопросы безопасности при проведении МРТ исследований рассмотрены в Белой книге Американского кол-

леджа радиологии «Безопасность МРТ», опубликованной в 2002 г. Последняя версия этого документа появилась в 2024 г. под новым названием «Руководство ACR по безопасной практике МРТ» [12]. В этом документе представлены также требования безопасности при использовании контрастных агентов и проведении МРТ-исследований при наличии имплантатов.

В России вопросы безопасности пациентов и медицинского персонала при проведении МРТ регулируются Приказом Минздрава РФ от 09.06.2020 № 560Н [13] и ГОСТ Р МЭК 60601-2-33–2013 [14]. В методических рекомендациях [8] рассмотрены основные вопросы, связанные с безопасным проведением магнитно-резонансного исследования, противопоказаниями и рисками, в том числе при сканировании пациентов с имплантированными медицинскими изделиями, а также контролем состояния пациента до и во время исследования. Актуальный обзор безопасного применения МРТ представлен в публикации [15], в котором от имени Международного общества магнитного резонанса в медицине (ISMRM) предоставлены справочные материалы в помощь учреждениям, разрабатывающим местные институциональные политики и процедуры, которые являются специфическими для эксплуатации МРТ с полем 7 Тл.

Соблюдение правил, приведенных в перечисленных выше документах, позволяет обеспечить безопасность как медицинского персонала и пациентов, так и других людей, которые каким-либо образом могут быть подвержены опасности при работе магнитно-резонансного томографа (технический и обслуживающий персонал).

## Материал и методы

В работе были проанализированы около 200 отечественных и зарубежных научных публикаций, содержащих информацию об уровнях статических и переменных электромагнитных полей, воздействующих на человека при проведении магнитно-резонансной томографии, а также о биологических эффектах воздействия магнитного поля на человека и о безопасности МРТ, которые были опубликованы в период 2000–2025 гг. Результаты значительной части из упомянутых выше статей (56), использованы в данной работе, включая 48 из них, которые опубликованы после 2010 г.

Первоначальный отбор статей проводился с использованием ключевых слов: «МРТ в слабых полях», «МРТ в высоких и сверхвысоких полях», «Основы безопасности при проведении магнитно-резонансной томографии», «Биологические эффекты воздействия статических и переменных магнитных полей» в базах данных PubMed, eLIBRARY, а также в Google и Yandex. В первую очередь рассматривались публикации, содержащие количественные характеристики уровней значимого опасного фактора.

Поиск литературы был ограничен статьями, в которых интенсивность магнитного поля и его частота рассматривались прежде всего в аспекте электромагнитной безопасности. Публикации для анализа отбирались на основе аннотаций и заголовков, релевантных тематике исследования. Окончательное решение для включения публикаций в анализ принимались авторами с использованием двойного контроля, а любые разногласия разрешались путем консенсуса.

Использованный алгоритм создания выборки релевантных публикаций был аналогичен описанному в работе [16] (за исключением оформления протоколов) и представлен на рис. 1.



Рис. 1. Алгоритм отбора публикаций для обзора [16]  
 Fig. 1. Selection algorithm for publications for review [16]

**Основные опасные факторы при МРТ**

**Статические магнитные поля**

По мере развития клинической МРТ появилось множество аргументов в пользу использования магнитных полей все большей интенсивности. К преимуществам МРТ с сильным магнитным полем относятся более высокое соотношение сигнал/шум, возможность проведения магнитно-резонансной спектроскопии и отдельных видов функциональной МРТ, высокоскоростная визуализация и осуществление визуализации с высоким разрешением [17, 18], а также использование многоядерной МРТ [1]. Однако стоимость проведения исследований является наиболее существенным препятствием для более широкого распространения МРТ с сильными (до 3 Тл) и сверхсильными магнитными полями (от 7 Тл). Использование МРТ с более низким магнитным полем имеет определённые преимущества с точки зрения затрат (капитальных, эксплуатационных, размещения) и комфорта для пациентов [18].

Современной альтернативой увеличению индукции постоянного магнитного поля при МРТ является использование гиперполяризованных газов в качестве контрастирующих агентов, что позволяет на несколько порядков повысить чувствительность МРТ по сравнению со стандартной МРТ на протонах [19–21].

Выводы Международной комиссии по неионизирующему излучению (ICNIRP) [22], касающиеся статического магнитного поля, таковы: текущая информация не указывает на какие-либо серьезные последствия для здоровья, возникающие в результате воздействия статических магнитных полей с индукцией до 8 Тл (см. табл. 1). Однако следует отметить, что такое воздействие может привести к потенциально неприятным сенсорным эффектам, таким как головокружение при движении головы или тела.

В XXI веке для повышения точности диагностики в клинических условиях уже успешно применяется МРТ с магнитами на 7 Тл [23]. Первое разрешение на использование сканеров с такими магнитными полями было предоставлено FDA (США) в 2017 г. [24]. В связи

Таблица 1

**Пределы воздействия магнитных полей в стандарте IEC 60601-2-33 [11]**  
**Limits of exposure to magnetic fields in the IEC 60601-2-33 standard [11]**

Пределы воздействия	Требования
Нормальное: до 3 Тл	Нет. Используется для рутинного сканирования
1-й уровень опасности: от 3 до 8 Тл	Необходим контроль под наблюдением врача
2-й уровень опасности: свыше 8 Тл	Требуется четкое подтверждение пациента и врача о готовности к такому риску

с растущим спросом на клиническую диагностику используется также МРТ сканеры с полем 9,4 Тл, но только на здоровых добровольцах [25, 26]. Все МРТ сканеры, выходящие за рамки 7 Тл, предназначены для фундаментальных исследований, либо для изучения функций мозга, либо для изучения патофизиологии различных заболеваний. Учитывая связанные с этим проблемы, маловероятно, что сканеры с полями, превышающими 7 Тл, будут использоваться для диагностики у отдельных пациентов, по крайней мере, в течение пары десятилетий. Однако знания, полученные с помощью таких систем о патологических процессах в группах людей и связанных с ними технологических достижениях, могут «просачиваться» в системы с меньшей магнитной индукцией, которые используются в клинических условиях [27].

В МРТ-сканерах на металлические предметы действуют притягивающие поступательные и вращательные силы [28]. Эти силы зависят от таких факторов, как состав материала, форма и ориентация предмета. Вращательные силы (крутящие моменты) пропорциональны статическому магнитному полю  $B_0$ , тогда как поступательные силы пропорциональны произведению  $B_0$  на пространственный градиент поля (SFG). SFG – это изменение статического магнитного поля с увеличением расстояния от магнита сканера; его локальное значение зависит от  $B_0$  и способа экранирования магнитной системы. По сравнению с 3-Тл МРТ, в 7-Тл МРТ магнит-

ное поле изменяется быстрее в зависимости от расстояния до магнита (см. рис. 2). Поскольку  $B_0$  и SFG при 7 Тл больше, чем при более низких полях, поступательные усилия на имплантаты, устройства и инородные тела при 7 Тл больше, чем соответствующие усилия при 1,5 и 3 Тл [23].

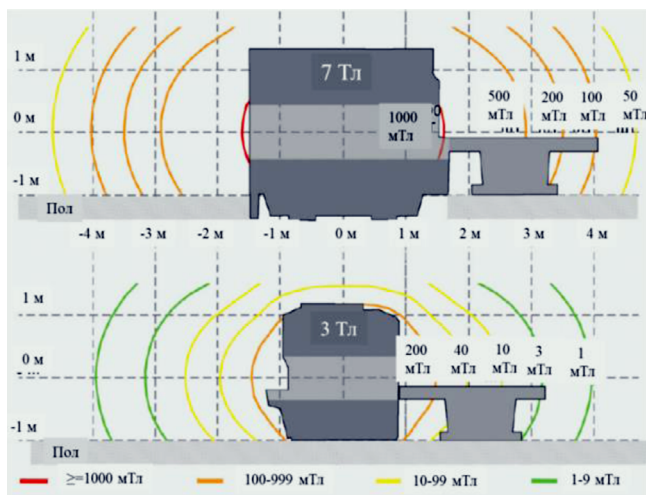


Рис. 2. Сравнение краевых магнитных полей двух клинических МРТ-систем. Сверху – краевые поля для 7-Тл МРТ-системы (Magnetom Terra, Siemens Healthineers), снизу – краевые поля для 3-Тл МРТ-системы (Magnetom Skyra, Siemens Healthineers). Уровни этих полей за пределами магнитов обозначены контурами, которые окрашены в соответствии с диапазонами напряженности поля. Адаптировано из работы [23]

Fig. 2. Comparison of the edge magnetic fields of two clinical MRI systems. Above – edge fields for a 7-T MRI system (Magnetom Terra, Siemens Healthineers), below – edge fields for a 3-T MRI system (Magnetom Skyra, Siemens Healthineers). The levels of these fields outside the magnets are marked by contours, which are colored according to the ranges of field strength. Adapted from [23]

Основная опасность, связанная с криогенными жидкостями в магнитных системах томографов, заключается в возможности их быстрого вскипания. За счет резкого повышения температуры происходит преобразование жидкости в газообразное состояние. При неправильной работе вентиляции это может сопровождаться охлаждением предметов вблизи магнита с вероятностью обморожения, образованием дымки и вытеснением воздуха из комнаты, приводящим к затруднению дыхания [8]. Выброс низкотемпературного газообразного гелия по аварийному газоотводному каналу происходит при аварийном отключении сверхпроводящего магнита, сопровождающимся резким падением индукции магнитного поля в течение нескольких секунд.

Современные исследования влияния сильных постоянных магнитных полей (СПМП) на мышцах, крысах и нейрогенных клетках человека продемонстрировали хороший эффект их биобезопасности [7]. Например, работе авторы [29] обнаружили, что 4-недельное воздействие полей в диапазоне 2,0–12,0 Тл не оказывает явного вредного воздействия на здоровых мышцах, а в статье [30] сообщено, что воздействие 33 Тл СПМП в течение 1 ч не оказывает вредного воздействия на нормальных взрослых мышцах. Примечательно, что в работе [31] обнаружили, что СПМП диапазона от 7 до 33 Тл обладают потенциалом в качестве антидепрессанта. Исследование, проведенное по полях до 22 Тл, показало противоопухолевую эффективность и биобезопасность СПМП в сочетании с препаратом platycodin D, который проявляет незначительные побочные эффекты при лечении рака легких [32].

Первое опубликованное исследование, в котором изучались реакции клеток человека на СПМП с индукцией вплоть до 27 Тл, показало, что такие поля могут не только изменять ориентацию и морфологию митотических веретен, но и предоставляют инструмент для изучения роли ориентации веретен и их возмущений в биологии развития рака [33].

### Градиентные магнитные поля и шум

Во время получения МРТ-изображения быстро включаются и выключаются дополнительные изменяющиеся в пространстве магнитные поля в градиентных катушках [3], что обеспечивает пространственное кодирование сигнала ЯМР от выбранного слоя. Интенсивность этих полей находится в диапазоне от миллитесла до десятков миллитесла в точках, которые расположены на краях рабочего туннеля томографа [12]. Амплитуды градиентных магнитных полей по отношению к статическому магнитному полю недостаточно высоки, чтобы оказывать притяжение внешних предметов. Однако они могут индуцировать токи, которые стимулируют периферические нервы, вызывая подергивание мышц и вибрацию металлических (не обязательно ферромагнитных) предметов [34].

Результирующее переменное магнитное поле в диапазоне частот от сотен герц до десятков килогерц создает электрическое поле в проводящих тканях человеческого тела. Это, в свою очередь, может генерировать нервное возбуждение, приводящее к стимуляции периферической нервной системы (ПНС). Вначале реакция ПНС приводит к тактильному ощущению на коже, но при более высоких амплитудах градиента магнитного поля и частоте переключения это приводит к потере мышечного контроля и, в конечном счете, к сильной боли. Эффективность работы градиентов в сканере, которая обуславливается длительностью градиентных импульсов и их амплитудой, специально ограничивают, чтобы свести к минимуму возникновения реакции ПНС у пациентов. В некоторых ситуациях, например, при проведении интервенционной магнитно-резонансной томографии, медицинские сотрудники могут находиться близко к отверстию рабочего туннеля во время визуализации. Однако быстрое уменьшение амплитуды градиентного поля за пределами туннеля означает, что крайне маловероятно, что эти работники будут испытывать реакции их ПНС [35].

Такой стимуляции может быть достаточно, чтобы вызвать дискомфорт, а в крайних случаях может привести к движению конечностей или фибрилляции желудочков. Организм наиболее чувствителен к фибрилляции на частотах от 10 до 100 Гц и к стимуляции периферических нервов на частоте до 5 кГц. Степень воздействия будет зависеть от формы импульса и частоты его повторения. При превышении этих частот нервные и мышечные клетки постепенно теряют чувствительность к электрической стимуляции [36].

Помимо этого, прохождение электрического тока через градиентные обмотки для создания магнитных полей создает большое усилие между обмотками, и при включении и выключении градиентов обмотки вибрируют, что приводит к появлению громкого шума, описываемого как постукивание, стрекотание или писк, в зависимости от используемого метода визуализации. Акустический шум является основным источником беспоконья для пациентов, проходящих магнитно-резонансную томографию (другой причиной является клаустрофобия). Уровень шума может достигать 100 дБ и более, что требует от пациентов и любого другого персонала

или лиц, осуществляющих уход находясь в комнате во время визуализации, использовать средства защиты органов слуха в виде берушей и/или защитных вкладышей [8, 23].

Увеличение уровня звука в поле  $V_0$  не является линейным, поскольку уже в ранних исследованиях показано, что увеличение магнитного поля с 0,5 до 1,0 Тл и с 1,0 до 2,0 Тл приводит к увеличению уровня звуковой мощности (SPL) на 5,7 и 5,2 дБ (L) [37]. Основываясь на логарифмическом масштабировании в  $20 \log(\Delta V_0)$ , можно предсказать увеличение на 6 дБ при удвоении амплитуды магнитного поля. В случае увеличения с 7 до 20 дБ ожидаемое значение, основанное на таком подходе, будет означать увеличение SPL на 9 дБ [38]. Однако это изменение может быть существенно меньше с учетом теоретического компьютерного моделирования виброакустического шума, которое сравнивало SPL для полей  $V_0$  в 3 Тл, 7 Тл и 10,5 Тл. Усредненные по спектру значения SPL составили 91,2, 97,5 и 100,8 дБ, если демпфирование по Лоренцу не включено, и 92,1, 89,8 и 90,5 дБ, если в расчеты включено затухание по Лоренцу [39].

### Радиочастотные электромагнитные поля

С радиотехнической точки зрения, развитие ЯМР-спектрометрии и МРТ основываются на решении двух основных задач. Первая из них – это создание однородного радиочастотного (РЧ) магнитного поля в заданной области пространства, вторая – это прием, усиление и регистрация слабого узкополосного сигнала, находящегося в ближнем поле одной или нескольких антенн (приёмные антенны могут как совпадать с передающими, так и отличаться от них). Величина индукции магнитного поля не влияет непосредственно на радиотехническую часть оборудования для регистрации ЯМР. Однако то, что она определяет рабочую частоту всей РЧ части спектрометра или томографа, приводит к существенной зависимости параметров приема и передачи РЧ энергии от величины статического магнитного поля, в котором производится наблюдение явления ЯМР [40]. В настоящее время передовые аналитические ЯМР-системы работают на частотах до 1 ГГц (23,5 Тл). Диапазон доклинических приборов варьируется от малогабаритных систем для животных с типичной частотой 600–800 МГц (14,1–18,8 Тл) до 900 МГц (21 Тл) [41].

Классическим следствием повышения величины постоянного магнитного поля является квадратичное повышение амплитуды сигнала ЯМР, а следовательно – и чувствительности МРТ. Поэтому МРТ в СПМП позволяет получать изображения с таким качеством, которое недостижимо для низкочастотных МРТ сканеров [40]. Тем самым в СПМП открываются новые возможности экспериментального исследования головного мозга, внутренних органов, суставов, нервной системы и т.д. [42].

Наиболее распространенным типом нежелательных явлений при МРТ являются радиочастотные ожоги, которые, в основном, вызваны введением в сканер электропроводящих материалов, прямым контактом тела с радиочастотными катушками, соприкосновением с отверстием сканера или электрическим контуром, образованным телом пациента [6]. Вероятность получения ожогов наиболее высока, когда пациент необшителен, находится под действием седативных препаратов или без сознания. Чтобы избежать ожогов, необходимо [43]:

- провести скрининг пациентов, чтобы исключить тех, у кого в теле есть металлические устройства или провода;
- убедиться, что пациенты сняли все металлические предметы перед входом в сканер, включая неферро-

магнитные ювелирные изделия, шнурки, пирсинг и серьги;

- убедиться, что все провода (такие как отведения ЭКГ, ЭМГ или ЭЭГ) не закольцованы, провода не проходят по обнаженной коже.

Мерилом степени опасности радиочастотного излучения является удельная скорость поглощения (SAR) – это показатель поглощения электромагнитной энергии организмом (обычно в единицах Вт/кг в единицу времени). Скорость поглощения радиочастотной энергии зависит от частоты радиочастотного излучения, размера, геометрии и специфических свойств поглощающей ткани.

Согласно правилам безопасности, технология получения МРТ-изображений ограничена тем, что может привести к повышению температуры активным на один градус (°C) [11, 14] (см. табл. 2). Ограничения по SAR устанавливаются программным образом в рамках используемой последовательности импульсов и мониторов радиочастотной мощности, которые ограничивают рабочий цикл радиочастотного сигнала, подаваемого на возбуждающие РЧ катушки.

Таблица 2

Регламент Международной электротехнической комиссии по удельной скорости поглощения (SAR). Адаптировано из работы [6]

#### International Electrotechnical Commission regulations on specific absorption rate (SAR). Adapted from [6]

Режим работы	Предел SAR для всего тела (Вт/кг)	Предел SAR для головы (Вт/кг)	Риск физиологического стресса	Требования
Норма	2	3,2	Маловероятно, что это вызовет физиологический стресс	Нет. Используется для рутинного сканирования
Контролируемый процесс первого уровня	4	3,2	Может вызвать физиологический стресс	Необходим контроль под наблюдением врача
Контролируемый процесс второго уровня	> 4	>3,2	Значительный риск физиологического стресса	Требуется четкое подтверждение готовности к такому риску

Чтобы избежать перегрева какой-либо локальной области, произведение времени и локальной SAR не должно превышать (в ваттах на килограмм в минуту [12, 44, 45]):

- 60 в среднем по голове;
- 120 в среднем по туловищу;
- 80 в среднем по конечностям при условии, что мгновенная SAR не превышает:
  - 4 Вт/кг в среднем по голове;
  - 8 Вт/кг в среднем по туловищу;
  - 12 Вт/кг в среднем по конечностям.

Параллельная передача (pTx) – это технология, предложенная Катшером и соавторами в 2003 г. [46]. В этом случае сигнал МРТ возбуждается путем передачи радиочастотной энергии с помощью нескольких передающих антенн, а не одной, как в стандартном методе МРТ [3]. Несмотря на то, что pTx является более сложным методом возбуждения, чем магнитно-резонансная томография с катушками типа «птичья клетка», параллельная передача обладает такими преимуществами, как 1) улучшенное качество возбуждения и 2) снижение SAR при сверхвысоких полях [47]. Действительно, при сверхвысоких полях (7 Тл для мозга и 3 Тл для тела) длина волны радиочастотной энергии в организме становится

ся сравнимой с размерами объекта сканирования, что создает сильно неоднородный профиль передаваемого поля. Технология рТх позволяет сбалансировать контрольные значения, связанные с энергопотреблением, включая локальный или глобальный SAR, и целевые пространственные характеристики радиочастотного поля  $B_1$  [48]. Такой подход особенно полезен в условиях сверхвысоких магнитных полей, позволяя улучшить качество изображения даже при большой магнитной индукции  $B_0$  [49].

**МРТ с контрастированием**

Изображения в МРТ формируют с использованием контраста между тканями, используя различия в свойствах их намагничивания [50], и уже на ранних этапах развития МРТ было найдено, что парамагнитные агенты существенно улучшают визуализацию тканей за счет, например, как в случае гадолиния (Gd), сокращения времен релаксации  $T_1$  и  $T_2$  ядер протонов  $^1H$  [51], [52]. Практическое значение на сегодняшний день имеют соли гадолиния ( $Gd^{3+}$ ), так как соединения с другими ионами ( $Mn^{2+}$ ,  $Fe^{3+}$ ,  $Cr^{3+}$  и т.д.) более токсичны и мало растворимы. Однако и сам по себе гадолиний в виде простых солей очень токсичен, поэтому он включается в состав хелатов.

В обзоре [53] рассматриваются исследовательские работы, касающиеся контрастных веществ на основе гадолиния (GBCA). Основное внимание уделено тому, как различные типы GBCA (как линейного типа, так и макроциклические) используются сегодня при МРТ-сканировании [54], см. табл. 3.

Описаны их свойства, клинические применения, вопросы безопасности, а также возможные направления разработок в этой области медицинской радиологии. Параллельное развитие технологий МРТ и GBCA повысило ценность контрастно усиленной магнитно-резонансной томографии для медицинской диагностики. В настоящее время GBCA используется примерно в 30 млн МРТ процедур ежегодно, а всего со времени появления таких препаратов в 1988 г. было введено более 450 миллионов доз [55]. Как подчеркнуто в документе [56], практическое использование GBCA предоставляет собой прекрасный пример медицинской помощи, которая спасает жизни людей. Рекомендации ACR 2021 г. больше не требуют проведения скрининга функции почек на наличие препаратов II группы как у стационарных, так и у амбулаторных пациентов [56].

Основные выводы сформулированы в работе [53] следующим образом:

- Использование контрастных веществ на основе гадолиния (GBCA) с линейной структурой при МРТ связано с побочными эффектами, включая отложение свободного гадолиния, его нефротоксичность

и аллергические реакции у пациентов. Это вызвало обеспокоенность по поводу безопасности таких контрастных агентов и привело к разработкам более безопасных контрастных веществ для МРТ.

- GBCA с линейной структурой имеют более высокий риск, несмотря на их большую специфичность и чувствительность. С точки зрения безопасности макроциклические GBCA более предпочтительны и, как правило, обладают низким уровнем побочных эффектов, хотя их эффективность может быть меньшей [52].

Однако врачам следует, по возможности, свести к минимуму повторные назначения GBCA, они также должны быть осторожны, избегая или откладывая необходимые процедуры МРТ с контрастированием парамагнитными ионами. Важно сбалансировать риски, так как при использовании линейных GBCA существует риск возникновения нефрогенного системного фиброза (NSF). Это редкий синдром, который включает фиброз кожи, суставов, глаз и внутренних органов. NSF вызван воздействием гадолиния в контрастных веществах при МРТ на его основе у пациентов с нарушением функции почек. Однако, вместе с тем, существует потенциальный вред от отказа в GBCA у пациентов, которым требуется использование таких препаратов.

**Зонирование пространства как метод обеспечения безопасности**

Введение зон безопасности и стандартов в области магнитного резонанса имеет жизненно важное значение для улучшения практики использования МРТ. Пространству, где осуществляется проведение МРТ, рекомендуется, как указано в регламентирующих документах [8, 11, 12], делить на 4 зоны (см. рис. 3).

Зона I включает в себя области со свободным доступом для пациентов и медицинского персонала. Контроль со стороны медицинских работников в этой зоне не проводится.

В зоне II пациенты и другой персонал, не занимающийся МРТ, проходят обследование перед входом в следующие две зоны. Пациентам требуется заполнить анкету-опросник, представить врачу информацию о наличии имплантированных медицинских изделий и требований к ним в условиях действия электромагнитных полей, а также снять с себя все металлические предметы.

Зона III – область, попадание в которую без проведения процедуры сканирования с помощью металлоискателя может привести к серьезным повреждениям и даже смертельному исходу вследствие взаимодействия имплантированных медицинских изделий или ферромагнитных объектов с постоянным магнитным полем. В связи с этим зона III должна находиться под жестким контролем медицинского персонала. Зона III, как правило,

Таблица 3

Контрастные вещества, содержащие ионы гадолиния ( $Gd^{3+}$ ). Адаптировано из работы [54]

Contrast agents containing gadolinium ions ( $Gd^{3+}$ ).

Adapted from [54]

Название	Химическое соединение	Сокращенное обозначение	Химическая структура	Производитель
Омнискан	Гадолиамид	Gd-DTPA-BMA	Линейная	Nycomed, Австрия
Магневист	Гадопентетата димеглумин	Gd-DTPA	Линейная	Schering, Германия
Мультиханс	Гадобената димеглумин	Gd-BOPTA	Линейная	Braeco, Италия
Примовист	Гадоксетовой кислоты динатриевая соль	Gd-EOB-DPTA	Линейная	Байер, Шеринг АГ (Германия)
Вазовист	Гадофосвесета тринатриевая соль	Gd-DTPA	Линейная	Меллинкродт Медикал Ink, США
Проханс	Гадотеридол	Gd-HP -DO3A	Циклическая	Braeco, Италия
Гадовист	Гадобутрол	Gd-BTDO3A	Циклическая	Шеринг АГ (Германия)
Дотарем	Гадотерата меглумин	GdDOTA	Циклическая	Guerbet, Франция

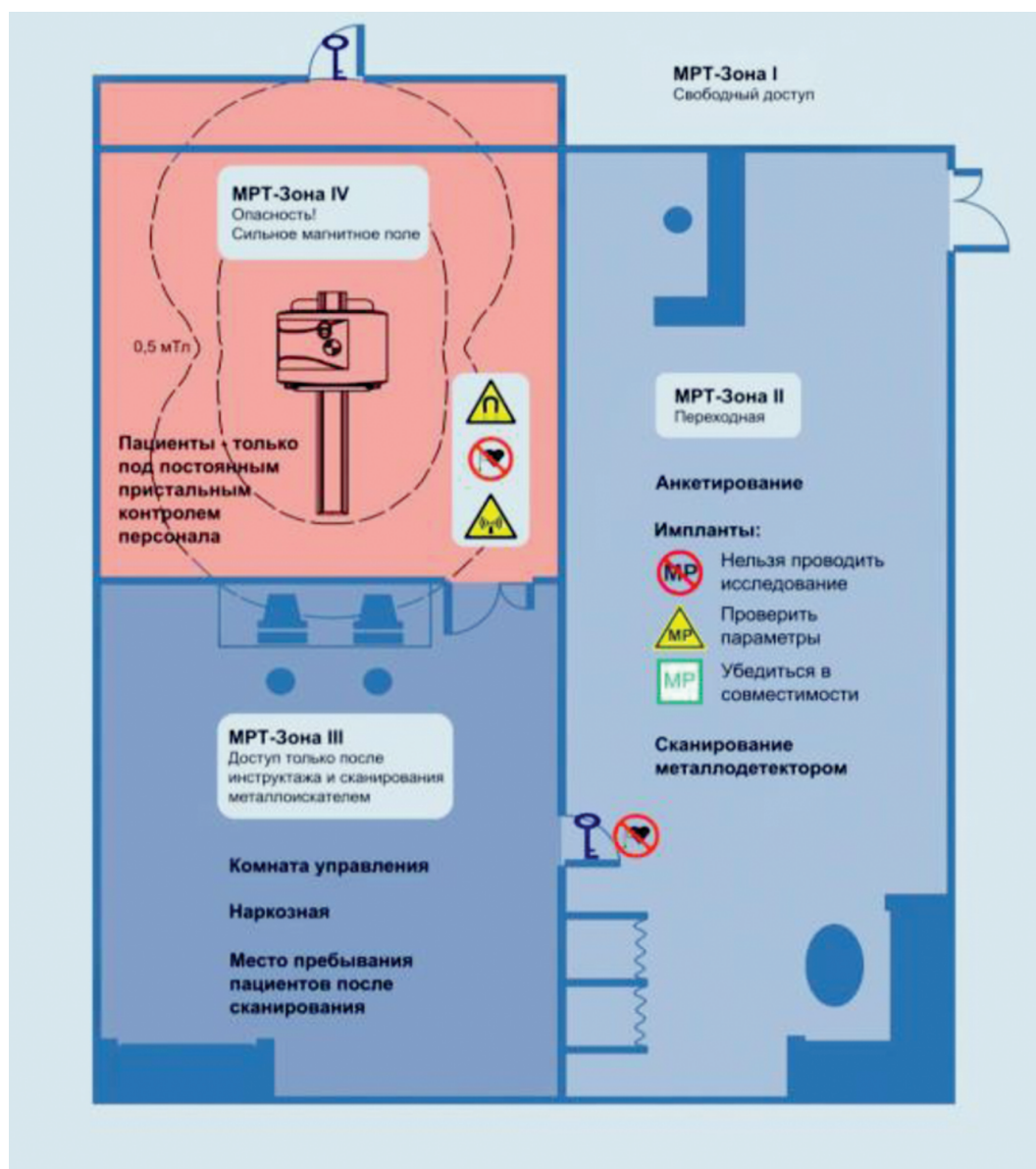


Рис. 3. Схема зонирования пространства кабинета (отделения) МРТ [8]

Fig. 3. Scheme of zoning of the space of the cabinet (department) MRI [8]

включает в себя место пребывания пациента после сканирования и тестирования, наркозную, комнату управления, вестибюль с переходом в Зону IV и прочее [8].

Зона IV представляет собой пространство, где находится МР-томограф, и, как правило, совпадает с комнатой сканирования (процедурной). Перед входом в зону IV должны располагаться предупреждающие и запрещающие знаки, так как она является потенциально опасной из-за наличия сильного магнитного поля.

### Заключение

Магнитно-резонансная томография продолжает всё больше охватывать новые медицинские области и сферы применения. Стремительно развивается МР-ангиография, внедряется в клинику МР-спектроскопия, всё чаще на практике используются контрастные вещества в МРТ-процедурах. Это даёт возможность проводить качественную диагностику больных, устанавли-

вать правильные диагнозы и, соответственно, назначать адекватное лечение.

Показано, что возможность проведения безопасных для пациента МРТ-процедур зависит от четкого исполнения установленных регулируемыми органами регламентов, индукции используемого статического магнитного поля, предполагаемой суммарной удельной скорости поглощения радиочастотного излучения, размера поля сканирования.

Работа выполнена в рамках Программы деятельности федерального государственного бюджетного учреждения «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт» на 2023–2027 гг. по направлению 4 «Исследования и разработки по развитию применения ядерных технологий в медицине» – Прикладные исследования в области разработки новых технологий наработки перспективных радионуклидов и стабильных изотопов.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

- Pirogov Yu.A., Anisimov N.V., Pavlova O.S., Pavlovskaya G.E., Sadykhov E., Gulyaev M.V., Volkov D.V., Semenova N., Naumova A.V., Meersmann T., Cabal-Mirabal C., Gervits L.L. Chapter 4 - Advances in Magnetic Resonance Tomography. Ed. Tishin A.M. Magnetic Materials and Technologies for Medical Applications. Woodhead Publishing, 2022. p. 107-152. doi: 10.1016/B978-0-12-822532-5.00005-4.
- Лагутин А.С., Григорьев Г.Ю. Технологический прогресс в магнитно-резонансной томографии // Медицинская физика. 2025. №2. С. 102-127 [Lagutin A.S., Grigor'yev G.Yu. Technological Progress in Magnetic Resonance Imaging. *Meditsinskaya Fizika* = Medical Physics. 2025;2:102-127 (In Russ.)]. doi: <https://doi.org/10.52775/1810-200X-2025-106-2-102-127>.
- Rinck P.A. Magnetic Resonance in Medicine. The Basic Textbook of the European Magnetic Resonance Forum. Digital version 14.2. URL: <https://magnetic-resonance.org/index.html>.
- Biological Effects of Static Magnetic Fields Singapore. Ed. Xin Zhang. Springer Nature Singapore Pte Ltd. 2023. 420 p. doi: 10.1007/978-981-19-8869-1.
- Formica D., Silvestri S. Biological Effects of Exposure to Magnetic Resonance Imaging: an Overview. *BioMedical Engineering OnLine*. 2004;3;11:12. doi: 10.1186/1475-925X-3-11.
- Mittendorff L., Young A., Sim J. A Narrative Review of Current and Emerging MRI Safety Issues: What Every MRI Technologist (Radiographer) Needs to Know. *J Med Radiat Sci*. 2022;69:250–260. doi: 10.1002/jmrs.546.
- Wang X., Ye Y., Zuo H., Li Y. Neurobiological Effects and Mechanisms of Magnetic Fields: a Review from 2000 to 2023. *BMC Public Health*. 2024;24: Article ID 3094. doi: 10.1186/s12889-024-18987-9.
- Сергунова К.А., Ахмад Е.С., Петряйкин А.В., Семенов Д.С., Васильев Ю.А., Кивасов С.А., Владзимирский А.В., Морозов С.П. Основы безопасности при проведении магнитно-резонансной томографии: Методические рекомендации №63. М.: Научно-практический клинический центр диагностики и телемедицинских технологий, 2019. 69 с. [Sergunova K.A., Akhmad Ye.S., Petryaykin A.V., Semenov D.S., Vasil'yev Yu.A., Kivasov S.A., Vladzimirskiy A.V., Morozov S.P. *Osnovy Bezopasnosti pri Provedenii Magnitno-Rezonansnoy Tomografii* = Fundamentals of Safety during Magnetic Resonance Imaging: Methodological Recommendations No. 63. Moscow, Nauchno-Prakticheskii Klinicheskii Tsentr Diagnostiki i Telemeditsinskikh Tekhnologiy Publ., 2019. 69 p. (In Russ.)]. URL: [https://telemedai.ru/biblioteka-dokumentov/osnovi\\_bezopasnosti\\_mrt](https://telemedai.ru/biblioteka-dokumentov/osnovi_bezopasnosti_mrt)
- Синицын В.Е. Безопасность магнитно-резонансной томографии – современное состояние вопроса // Диагностическая и интервенционная радиология. 2010. Т.4. №3. С. 61-66 [Sinitsyn V.Ye. Safety of Magnetic Resonance Imaging - the Current State of the Issue. *Diagnosticheskaya i Interventsionnaya Radiologiya* = Diagnostic and Interventional Radiology. 2010;4;3:61-66 (In Russ.)]. URL: [https://radiology-diagnos.ru/sites/default/files/vol4\\_3\\_2010\\_p61-66.pdf](https://radiology-diagnos.ru/sites/default/files/vol4_3_2010_p61-66.pdf)
- Directive 2013/35/EU - Electromagnetic Fields. Latest Update: 14/11/2024. URL: <https://osha.europa.eu/en/legislation/directives/directive-2013-35-eu-electromagnetic-fields>.
- International Standard IEC 60601-2-33. 2022. URL: <https://www.en-standard.eu/iec-60601-2-33-2022-medical-electrical-equipment-part-2-33-particular-requirements-for-the-basic-safety-and-essential-performance-of-magnetic-resonance-equipment-for-medical-diagnosis/>
- ACR Manual on MR Safety 2024. 2024. URL: <https://www.acr.org/Clinical-Resources/Clinical-Tools-and-Reference/radiology-safety/mr-safety>.
- Правила проведения рентгенологических исследований. Приказ Минздрава РФ от 09.06.2020 № 560Н [Rules for Conducting X-ray Examinations. Order of the Ministry of Health of the Russian Federation dated 09.06.2020 No. 560N (In Russ.)]. URL: <https://normativ.kontur.ru/document?module=1&documentId=412656>.
- Изделия медицинские электрические. Часть 2-33. Частные требования безопасности с учетом основных функциональных характеристик к медицинскому диагностическому оборудованию, работающему на основе магнитного резонанса: ГОСТ Р МЭК 60601-2-33-2013, 2016 [Medical Electrical Equipment. Part 2-33. Particular Safety Requirements Taking Into Account the Essential Performance Characteristics of Medical Diagnostic Equipment Using Magnetic Resonance. GOST R IEC 60601-2-33-2013, 2016. (In Russ.)]. URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293773/4293773893.pdf>.
- Fagan A.J., Bitz A.K., Björkman-Burtscher I.M., Collins C.M., Kimbrell V., Raaijmakers A.J.E. 7T MR Safety. *J Magn Reson Imaging*. 2021;53;2:333–346. doi: 10.1002/jmri.27319.
- Мальшева А.В., Косяков Д.В., Гуськов А.Е. Методика формирования выборки публикаций для подготовки научных обзоров // Научные и технические библиотеки. 2022. №11. С. 56-81 [Malysheva A.V., Kosyakov D.V., Gus'kov A.Ye. Methodology for Forming a Sample of Publications for Preparing Scientific Reviews. *Nauchnyye i Tekhnicheskkiye Biblioteki* = Scientific and Technical Libraries. 2022;11:56-81 (In Russ.)]. doi: 10.33186/1027-3689-2022-11-56-81.
- Ladd M.E., Bacherta P., Meyerspeere M., Moser E, Nagela A.M., Norris D.G., Schmitter S., Speck O. Pros and Cons of Ultra-High-Field MRI/MRS for Human Application. *Progress in Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy*. 2018;109:1-50. doi: 10.1016/j.pnmrs.2018.06.001.
- Nikpanah M., Willoughby W.R., Campbell-Washburn A., Denney Jr T.S., Malayeri A.A., ver Hoef L., Porter K.K. Low Versus Ultra-High Field MRI: How to Select Your MRI Fleet. Supplement to *Applied Radiology*. 2023;28-41. URL: [https://cdn.agilitycms.com/applied-radiology/PDFs/Issues/LOH-AR\\_01-23\\_Nikpanah.pdf](https://cdn.agilitycms.com/applied-radiology/PDFs/Issues/LOH-AR_01-23_Nikpanah.pdf)
- Barskiy D.A., Coffey A.M., Nikolaou P., Mikhaylov D.M., Goodson B.M., Branca R.T., Lu G.J., Shapiro M.G., Ville-Veikko Telkki, Zhivonitko V.V., Koptyug I.V., Salnikov O.G., Kovtunov K.V., Bukhtiyarov V.I., Rosen M.S., Barlow M.J., Shahideh Safavi, Hall I.P., Schröder L., Chekmenev E.Y. NMR Hyperpolarization Techniques of Gases. *Chemistry*. 2017;23:725-51. doi: 10.1002/chem.201603884.
- Григорьев Г.Ю., Завалева Е.В., Лагутин А.С. Клинические применения ксенона-129 в магнитно-резонансной томографии: краткий обзор // Медицинская физика. 2024. №2. С. 91-109 [Grigor'yev G.Yu., Zavaleva Ye.V., Lagutin A.S. Clinical Applications of Xenon-129 in Magnetic Resonance Imaging: a Brief Review. *Meditsinskaya Fizika* = Medical Physics. 2024;2:91-109 (In Russ.)]. Doi: 10.52775/1810-200X-2024-102-2-91-109.
- Khan A.S., Harvey R.L., Birchall J.R., Irwin R.K., Nikolaou P., Schrank G., Kiarash Emami, Dummer A., Barlow M.J., Goodson B.M., Chekmenev E.Y. Enabling Clinical Technologies for Hyperpolarized Xenon-129 MRI and Spectroscopy. *Angew Chem Int Ed Engl*. 2021;60;41:22126-47. doi: 10.1002/anie.202015200.
- International Commission on Non-Ionising Radiation (IC-NIRP), Amendment to the ICNIRP “Statement on Medical Magnetic Resonance (MR) Procedures: Protection of Patients”. *Health Physics*. 2004;87;2:197-216. doi: 10.1097/00004032-200408000-00008.
- Hoff M.N., McKinney A., Shellock F.G., Rassner U., Gilk T., Watson Jr R.E., Greenberg T.D., Froelich J., Kanal E. Safety Considerations of 7-T MRI in Clinical Practice. *Radiology*. 2019;292:509-518. doi: 10.1148/radiol.2019182742
- FDA Clears First 7T Magnetic Resonance Imaging Device 2017. URL: <https://www.fda.gov/NewsEvents/Newsroom/PressAnnouncements/ucm580154.htm>.
- Thulborn K.R., Atkinson I.C., Saad J., Pliskin N.H.. Safety of 9.4 Tesla for Neuroimaging of Healthy and For-Cause Volunteers. *J Radiol Clin Imaging*. 2019;22:023-033. doi: 10.26502/jrci.2644-2809011.
- Ruhm L., Advievich N., Ziegs T., Nagel A.M., De Feyter H.M., de Graaf R.A., Henning A. Deuterium Metabolic Imaging in the Human Brain at 9.4 Tesla with High Spatial and Temporal Resolution. *Neuroimage*. 2021;244:Article ID 118639. doi:10.1016/j.neuroimage.2021.118639.

27. Platt T., Ladd M.E., Paech D. 7 Tesla and Beyond: Advanced Methods and Clinical Applications in Magnetic Resonance Imaging. *Investigative Radiology*. 2021;56;11:705-725. doi: 10.1097/RLI.0000000000000820.
28. Schenck J.E. Safety of Strong, Static Magnetic Fields. *Journal of Magnetic Resonance Imaging*. 2000;12;1:2-19. doi: 10.1002/1522-2586(200007)12:1<2::aid-jmri2>3.0.co;2-v.
29. Wang S., Luo J., Lv Y., Zhang Z., Yang J., Dong D., Fang Y., Hu L., Liu M., Liao Z., Li J., Fang Z., Wei Y., Han W., Shaikh A.B. Safety of Exposure to High Static Magnetic Fields (2 T-12 T): a Study on Mice. *Eur Radiol*. 2019;29:6029-6037. doi: 10.1007/s00330-019-06256-y.
30. Tian X., Lv Y., Fan Y., Wang Z., Yu B., Song C., Lu Q., Xi C., Pi L., Zhang Z. Safety Evaluation of Mice Exposed to 7.0-33.0 T High-Static Magnetic Fields. *J Magn Reson Imaging*. 2021;53:1872-1884. doi: 10.1002/jmri.27496.
31. Lv Y., Fan Y., Tian X., Yu B., Song C., Feng C., Zhang L., Ji X., Zablotskii V., Zhang X. The Anti-Depressive Effects of Ultra-High Static Magnetic Field. *J Magn Reson Imaging*. 2022;56:354-365. doi: 10.1002/jmri.28035.
32. Yang X., Yu B., Xi C., Song C., Yang R., Wang W., Wang X., Zhang X., Feng C., Wang X., Cheng G., Chen Y., Zhu Y. A Safety Study on Ultra-High or Moderate Static Magnetic Fields Combined with Platycodin D Against Lung Cancer. *Oncology Letters*. 2023;26;4: Article ID 453. doi: 10.3892/ol.2023.14040.
33. Zhang L., Hou Y., Li Z., Ji X., Wang Z., Wang H., Tian X., Yu F., Yang Z., Pi L., Mitchison T.J., Lu Q., Zhang X. 27 T Ultra-High Static Magnetic Field Changes Orientation and Morphology of Mitotic Spindles in Human Cells. *Biophysics and Structural Biology*. *Cell Biology*. 2017;6: Article ID e22911. doi: 10.7554/eLife.22911.
34. Santini F., Pansini V., Deligianni X., Caligiuri M.E., Oei E.H.G. ESR Essentials: Advanced MR Safety in Vulnerable Patients – Practice Recommendations by the European Society for Magnetic Resonance in Medicine and Biology. *European Radiology*. 2025;35:1785–1793. doi: 10.1007/s00330-024-11055-1.
35. Keevil S. Safety in Magnetic Resonance Imaging. *Medical Physics International Journal*. 2016;4;1:26-34. URL: <http://mpijournal.org/pdf/2016-01/MPI-2016-01-p026.pdf>.
36. Safety Guidelines for Magnetic Resonance Imaging Equipment in Clinical Use. 2021. URL: [https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment\\_data/file/958486/MRI\\_guidance\\_2021-4-03c.pdf](https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/958486/MRI_guidance_2021-4-03c.pdf).
37. Moelker A., Wielopolski P.A., Pattynama P.M.T. Relationship between Magnetic Field Strength and Magnetic-Resonance-Related Acoustic Noise Levels. *Magn. Reson. Mater. Phys. Biol. Med*. 2003;16;1: 52–55. doi: 10.1007/s10334-003-0005-9.
38. Budinger T.F., Bird M.D. MRI and MRS of the Human Brain at Magnetic Fields of 14 T to 20 T: Technical Feasibility, Safety, and Neuroscience Horizons. *NeuroImage*. 2018;168:509–531. doi: 10.1016/j.neuroimage.2017.01.067.
39. Simone A., Winkler S.A., Alejski A., Wade T., McKenzie C.A., Rutt B.K. On the Accurate Analysis of Vibroacoustics in Head Insert Gradient Coils. *Magnetic Resonance in Medicine* 2017;78:1635–1645. doi 10.1002/mrm.26543.
40. Зубков М.А., Андрейченко А.Е., Кретов Е.Т., Соломаха Г.А., Мельчакова И.В., Фокин В.А., Симовский К.Р., Белов П.А., Слобожанюк А.П. МР томография в сверхвысоком поле: новые задачи и новые возможности // Успехи физических наук. 2019. №189. С. 1293–1314 [Zubkov M.A., Andreychenko A.E., Kretov Ye.T., Solomakha G.A., Mel'chakova I.V., Fokin V.A., Simovskiy K.R., Belov P.A., Slobozhanyuk A.P. MR Tomography in an Ultra-High Field: New Challenges and New Possibilities. *Uspekhi Fizicheskikh Nauk = Advances in Physical Sciences*. 2019;189:1293–1314 (In Russ)]. doi: 10.3367/UFNr.2018.12.038505.
41. Moser E., Laistler E., Schmitt F., Kontaxis G. Ultra-High Field NMR and MRI -the Role of Magnet Technology to Increase Sensitivity and Specificity. *Frontiers in Physics*. 2017;5: Article ID 33. doi: 10.3389/fphy.2017.00033.
42. Chizhik V.I., Chernyshev Y.S., Donets A.V. *Magnetic Resonance and Its Applications*. Springer International Publishing, 2014. 782 p. doi:10.1007/978-3-319-05299-1.
43. MRI Safety Tutorial. 2023. URL: <https://www.biac.duke.edu/research/safety/mri-safety-tutorial>.
44. Shellock F.G. Radiofrequency Energy-Induced Heating during MR Procedures: a Review. *Journal of magnetic resonance*. 2000;12;1:30–36. doi: 10.1002/1522-2586(200007)12:1<30::aid-jmri4>3.0.co;2-s.
45. Fiedler T.M., Ladd M.E., Clemens M., Bitz A.K. Safety of Subjects During Radiofrequency Exposure in Ultra-High-Field Magnetic Resonance Imaging. *IEEE Letters on Electromagnetic Compatibility Practice and Applications*. 2020;2;3:85 – 91. doi: 10.1109/lemcpa.2020.3029747.
46. Katscher U., Bo P., Leussler C., van den Brink J.S. Transmit SENSE. *Magnetic Resonance in Medicine*. 2003;49:144–150. doi 10.1002/mrm.10353.
47. Guérin B., Setsompop K., Ye H., Poser B.A., Stenger A.V., Wald L.L. Design of Parallel Transmission Pulses for Simultaneous Multislice with Explicit Control for Peak Power and Local Specific Absorption Rate. *Magnetic Resonance in Medicine*. 2015;73:1946–1953. doi: 10.1002/mrm.25325.
48. Homann H. SAR Prediction and SAR Management for Parallel Transmit MRI. *Karlsruhe Transactions on Biomedical Engineering*. Ed. Karl Sruhe. KIT Scientific Publishing, 2012. 142 p. ISBN-10: 3866448007. URL: <https://www.deutsche-digitale-bibliothek.de/item/GMPR2AA5PUADHFVACP6XN-Q7KYS63AWH>].
49. Godinez F., Tomi-Tricot R., Quesson B., Barthel M., Lykowsky G., Scott G., Razavi R., Hajnal J., Malik S. . An 8 Channel Parallel Transmit System with Current Sensor Feedback for MRI-Guided Interventional Applications. *Phys. Med. Biol*. 2021;66:Article ID 21NT05. doi: 10.1088/1361-6560/ac2fbc.
50. Wahsner J., Gale E.M., Rodríguez-Rodríguez A., Caravan P. Chemistry of MRI Contrast Agents: Current Challenges and New Frontiers. *Chem Rev*. 2019;119;2:957-1057. doi: 10.1021/acs.chemrev.8b00363
51. Трофимова Т.Н., Шимановский Н.Л. Новые возможности улучшения дифференциальной диагностики инсульта и опухолей головного мозга с помощью МРТ с контрастным усилением гадовистом // Лучевая диагностика и терапия. 2016. Т. 2. №7. С. 93-109 [Trofimova T.N., Shimanovskiy N.L. New Possibilities for Improving Differential Diagnostics of Stroke and Brain Tumors Using MRI with Contrast Enhancement by Gadovist. *Luchevaya Diagnostika i Terapiya = Radiation diagnostics and therapy*. 2016;2;7: 93-109 (In Russ)]. URL: <https://radiag.bmoc-spb.ru/jour/article/viewFile/129/130>.
52. Cowling T., Frey N. Macrocyclic and Linear Gadolinium Based Contrast Agents for Adults Undergoing Magnetic Resonance Imaging: a Review of Safety. 2019. URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK546000/>.
53. The Application, Safety, and Recent Developments of Commonly Used Gadolinium-Based Contrast Agents in MRI: a Scoping Review. *Emergency Medicine Journal*. 2024; 9;3: 63-73. Doi: 10.33590/emj/ZRVN2069.
54. Контрастирующие вещества в магнитно-резонансной томографии. [Contrast Agents in Magnetic Resonance Imaging (In Russ)]. URL: <https://spbbran.ru/ru/mrtcontrasts>. Accessed April 23 2025.
55. Soloff E.V., Wang C.L. Safety of Gadolinium Use in Patients with Advanced CKD/Dialysis a Radiologist's Perspective. *Kidney360*. 2020;1:123–126. doi: <https://doi.org/10.34067/KID.0000502019>.
56. ACR Manual on Contrast Media, 2024. URL: <https://edge.sitcorecloud.io/americanoldf5f-acrogrf92a-production-cb02-3650/media/ACR/Files/Clinical/Contrast-Manual/ACR-Manual-on-Contrast-Media.pdf>.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Финансирование.** Исследование не имело спонсорской поддержки.

**Участие авторов.** Статья подготовлена с равным участием авторов.

**Поступила:** 20.07.2025. Принята к публикации: 25.08.2025.

**Conflict of interest.** The authors declare no conflict of interest.

**Financing.** The study had no sponsorship.

**Contribution.** Article was prepared with equal participation of the authors.

**Article received:** 20.07.2025. Accepted for publication: 25.08.2025.