

Применение магнитно-резонансной томографии для оценки ремоделирования сердца и стратификации риска у пациентов с легочной артериальной гипертензией

А.М. Шария^{✉1}, Т.В. Мартынюк^{1,2}, М.А. Шария^{1,3}, Д.В. Устюжанин¹

¹ФГБУ «Национальный медицинский исследовательский центр кардиологии им. акад. Е.И. Чазова» Минздрава России, Москва, Россия;

²ФГАОУ ВО «Российский национальный исследовательский медицинский университет им. Н.И. Пирогова» Минздрава России, Москва, Россия;

³ФГАОУ ВО «Первый Московский государственный медицинский университет им. И.М. Сеченова» Минздрава России (Сеченовский Университет), Москва, Россия

Аннотация

Магнитно-резонансная томография (МРТ) – высокоточный метод диагностики сердечно-сосудистых заболеваний. Одновременно с анатомией и функцией правого желудочка МРТ позволяет оценить легочное кровообращение, что обуславливает широкое применение этого метода в диагностике и динамическом наблюдении за пациентами с легочной артериальной гипертензией. Обзорная статья посвящена оценке ремоделирования сердца, а также стратификации риска этой группы пациентов с помощью МРТ. Особое внимание уделено новым прогностическим параметрам, включенным в шкалу стратификации риска летальности пациентов с легочной артериальной гипертензией в рекомендациях Европейского общества кардиологов/Европейского респираторного сообщества 2022 г.

Ключевые слова: магнитно-резонансная томография, легочная гипертензия, легочная артериальная гипертензия, стратификация риска, прогноз

Для цитирования: Шария А.М., Мартынюк Т.В., Шария М.А., Устюжанин Д.В. Применение магнитно-резонансной томографии для оценки ремоделирования сердца и стратификации риска у пациентов с легочной артериальной гипертензией. Терапевтический архив. 2023;95(4):291–295. DOI: 10.26442/00403660.2023.04.202161

© ООО «КОНСИЛИУМ МЕДИКУМ», 2023 г.

EDITORIAL ARTICLE

Applying of magnetic resonance tomography for assessment of cardiac remodeling and risk stratification in patients with pulmonary arterial hypertension

Archil M. Shariya^{✉1}, Tamila V. Martynyuk^{1,2}, Merab A. Shariya^{1,3}, Dmitry V. Ustyuzhanin¹

¹Chazov National Medical Research Center of Cardiology, Moscow, Russia;

²Pirogov Russian National Research Medical University, Moscow, Russia;

³Sechenov First Moscow State Medical University (Sechenov University), Moscow, Russia

Abstract

Magnetic resonance imaging – is high precision method for diagnosing cardiovascular diseases. Simultaneously with the anatomy and function of the right ventricle, magnetic resonance imaging allows to assess the pulmonary circulation, which leads to the widespread use of this method in the diagnosis and dynamic monitoring of patients with pulmonary arterial hypertension. The article is devoted to the assessment of cardiac remodeling and risk stratification of this group of patients. Special attention is given to new prognostic parameters included in the scale for risk stratification of patients with pulmonary hypertension of the European Society of Cardiology/European Respiratory Society 2022.

Keywords: magnetic resonance tomography, pulmonary hypertension, pulmonary arterial hypertension, risk stratification, prognosis

For citation: Shariya AM, Martynyuk TV, Shariya MA, Ustyuzhanin DV. Applying of magnetic resonance tomography for assessment of cardiac remodeling and risk stratification in patients with pulmonary arterial hypertension. *Terapevticheskii Arkhiv (Ter. Arkh.)*. 2023;95(4):291–295. DOI: 10.26442/00403660.2023.04.202161

Информация об авторах / Information about the authors

[✉]Шария Арчил Мерабович – лаборант-исследователь отд. легочной гипертензии и заболеваний сердца Института клинической кардиологии им. А.Л. Мясникова ФГБУ «НМИЦ кардиологии им. акад. Е.И. Чазова». Тел.: +7(916)532-43-94; e-mail: achishar@yandex.ru; ORCID: 0000-0002-7904-6735

Мартынюк Тамила Витальевна – д-р мед. наук, рук. отд. легочной гипертензии и заболеваний сердца Института клинической кардиологии им. А.Л. Мясникова ФГБУ «НМИЦ кардиологии им. акад. Е.И. Чазова», проф. каф. кардиологии фак-та дополнительного профессионального образования ФГАОУ ВО «РНИМУ им. Н.И. Пирогова». ORCID: 0000-0002-9022-8097

Шария Мераб Арчилович – д-р мед. наук, вед. науч. сотр. отд. томографии Научно-исследовательского института клинической кардиологии им. А.Л. Мясникова ФГБУ «НМИЦ кардиологии им. акад. Е.И. Чазова», проф. каф. лучевой диагностики ФГАОУ ВО «Первый МГМУ им. И.М. Сеченова» (Сеченовский Университет). ORCID: 0000-0002-0370-5204

[✉]Archil M. Shariya. E-mail: achishar@yandex.ru; ORCID: 0000-0002-7904-6735

Tamila V. Martynyuk. ORCID: 0000-0002-9022-8097

Merab A. Shariya. ORCID: 0000-0002-0370-5204

Легочная артериальная гипертензия (ЛАГ) – прогрессирующее инвалидизирующее заболевание, опосредованное сложными механизмами поражения прекапиллярных легочных сосудов, такими как вазоконстрикция, гипертрофия гладкомышечных клеток, пролиферация эндотелия и тромбоз. Эти изменения приводят к увеличению легочного сосудистого сопротивления (ЛСС) и давления в легочной артерии (ДЛА), повышению нагрузки на правый желудочек (ПЖ) и в итоге к его недостаточности и смерти пациента. В клинической классификации эта прекапиллярная форма ЛГ относится к 1-й группе и устанавливается при исключении заболеваний легких, последствий тромбоэмболии в систему легочной артерии (ЛА), других редко встречающихся патологий в качестве возможных причин повышения ДЛА [1, 2]. В спектре ЛАГ выделяют несколько нозологических форм: идиопатическую легочную гипертензию (ИЛГ); наследуемую ЛГ; ЛАГ, индуцированную приемом лекарств и токсинов; ЛАГ, ассоциированную с системными заболеваниями соединительной ткани, портальной гипертензией, врожденными пороками сердца, ВИЧ-инфекцией, шистосомозом [2]. Прогноз и выживаемость пациентов с ЛАГ всегда интересовали специалистов, занимающихся данной проблематикой. Впервые регистр пациентов с ИЛГ организован в США с 1981 по 1986 г. Всего в анализ включены 187 пациентов. Показателями, связанными с плохой выживаемостью, оказались функциональный класс (ФК) III или IV по классификации Нью-Йоркской ассоциации сердца (NYHA); повышенное среднее давление в правом предсердии, повышенное среднее ДЛА (срДЛА), наличие феномена Рейно, низкий сердечный индекс, пониженная способность к диффузии монооксида углерода. Медиана выживаемости среди пациентов с ФК I и II составила около 6 лет в сравнении с 2,5-летней выживаемостью среди пациентов с III ФК и с 6 мес у пациентов с IV ФК [3].

За последние десятилетия появились принципиально новые лечебные подходы в лечении пациентов с ЛАГ. В настоящее время цель лечения ИЛГ определяется как достижение низкого профиля риска смерти, замедление клинического прогрессирования болезни, улучшение функционального статуса пациентов. Это определяет потребность в создании новых и улучшении имеющихся шкал стратификации риска, обогащение их новыми параметрами, имеющими большую прогностическую значимость до формирования клинической картины прогрессирования ЛАГ. За последние 30 лет созданы многочисленные регистры пациентов с ЛАГ в США и Западной Европе, которые позволяют получить актуальную картину прогрессирования заболевания и выживаемость пациентов на фоне изменяющейся лечебной тактики. Опираясь на данные, полученные в этих регистрах, разработано множество шкал и формул для стратификации риска пациентов [4]. Большинство из них включают такие переменные, как ФК (по NYHA); дистанция в тесте 6-минутной ходьбы; уровень NT-proBNP/BNP; данные катетеризации правых отделов сердца (КПОС) [4].

Структурная и функциональная оценка ПЖ играет главенствующую роль в диагностике, а также в динамическом наблюдении пациентов с ЛАГ. В отличие от левого желудочка (ЛЖ), который можно смоделировать как симметричный эллипсоид, ПЖ имеет форму полумесяца в

перечном сечении и треугольную форму при взгляде сбоку. В связи с этим оценка множества параметров с помощью лишь двухмерной эхокардиографии невозможна.

Этих ограничений лишена магнитно-резонансная томография (МРТ). В течение последнего десятилетия МРТ все чаще применяется для оценки сердечно-сосудистых заболеваний и стала методом визуализации 1-й линии в оценке многих типов врожденных и приобретенных сердечно-сосудистых заболеваний, включая врожденные пороки сердца, инфаркт миокарда, дилатационную кардиомиопатию и др.

Возможности МРТ в оценке ремоделирования сердца при ЛАГ

МРТ сердечно-сосудистой системы является «золотым стандартом» для анализа структуры/функции желудочков сердца и все чаще применяется у пациентов с ЛАГ. Точная оценка структуры и функции ПЖ чрезвычайно важна при оценке и последующем наблюдении за пациентами с ЛАГ. По ходу развития заболевания в ответ на перегрузку давлением при ЛАГ возникает компенсаторная гипертрофия миокарда ПЖ, за которой следуют прогрессирующая сократительная дисфункция, дилатация камер и, наконец, клинические признаки декомпенсированной правожелудочковой недостаточности, характеризующиеся повышением давления наполнения и снижением сердечного выброса. Таким образом, функция и размер ПЖ являются не только показателем тяжести и хронизации ЛАГ, но и дополнительной причиной клинических симптомов и снижения продолжительности жизни. Тенденция к увеличению объема ПЖ и снижению ударного объема ПЖ и диастолического объема ЛЖ является предиктором смертности и неэффективности лечения. МРТ позволяет рассчитать эти показатели с высокой точностью, а также выполнять повторные исследования для оценки динамики на фоне лечения.

Межжелудочковое взаимодействие – это термин, который обозначает способность формы, размеров и податливости одного желудочка влиять на форму, размеры, соотношение давления и объема другого желудочка за счет того, что они связаны анатомически и электрофизиологически [4]. Измерение кривизны межжелудочковой перегородки (МЖП) – еще один параметр, который возможно оценить с помощью МРТ сердца. МЖП в норме изгибается вправо. У здоровых людей во всех фазах сердечного цикла ЛЖ сохраняет круглую форму, а ПЖ – форму полумесяца. При перегрузке ПЖ давлением перегородка уплощается или даже выпячивается влево в начале диастолы, что приводит к серповидной форме ЛЖ. Величина, обратная радиусу изгиба, – кривизна – используется, чтобы количественно отражать уплощение МЖП [4]. S. Dellegrottaglie и соавт. доказали, что этот показатель, полученный с помощью МРТ, коррелирует с систолическим ДЛА, рассчитанным при КПОС [5].

Индекс эксцентричности (ИЭ) – еще один показатель оценки кривизны МЖП. Данный показатель представляет собой отношение двух диаметров полости ЛЖ [6]. Увеличение ИЭ ЛЖ в систолу указывает на перегрузку ПЖ давлением, а в диастолу – объемом [6]. Y. Yamasaki и соавт. показали наличие сильной взаимосвязи между срДЛА и систолическим ИЭ ($r=0,81$; $p<0,0001$) [7].

Кроме изучения анатомии и функции желудочков МРТ позволяет количественно рассчитать параметры кровотока в магистральных сосудах. Для этого применяется методика магнитно-резонансной ангиографии, при которой помимо анатомических изображений получают фазовые характеристики, содержащие информацию о направлении и скорости кровотока. Эти изображения используют для количественного обсчета [8]. Фазово-контрастная магнитно-резонансная ангиография может выполняться как в двухмерном режиме (2D), так и в четырехмерном (4D). Средняя скорость кровотока, рассчитанная с помощью фазово-контрастной МРТ, коррелирует со срДЛА ($r=-0,73$; $p<0,001$) и ЛСС ($r=-0,86$; $p<0,001$) у пациентов с ЛАГ, а ее уменьшение обычно происходит совместно с дилатацией сосуда [9]. Значение менее $11,7 \text{ см/с}^{-1}$ ассоциировано с срДЛА $\geq 25 \text{ мм рт. ст.}$ с чувствительностью 93% и специфичностью 82% или ЛСС $> 3 \text{ Ед. Вуда}$ с чувствительностью 91% и специфичностью 93% [9].

В исследовании G. Reiter и соавт. с помощью 4D фазово-контрастной МРТ выявлен ретроградный систолический вихревой поток вдоль ствола ЛА, который не визуализировался у пациентов с нормальным ДЛА. Результаты показали, что параметр, отражающий процентное соотношение длительности вихревого кровотока (Tvortex) по отношению к длительности сердечного цикла, связан с уровнем срДЛА. Tvortex 14,3% и более выявляет ЛГ с чувствительностью 97% и специфичностью 96% [10].

По мере прогрессирования недостаточности ПЖ показатели ДЛА могут уменьшаться, тогда как ЛСС продолжает увеличиваться. При помощи МРТ возможно провести количественное определение ЛСС. При сопоставлении ЛСС, полученного с помощью МРТ, с данными КПОС выявлена сильная корреляция как у пациентов с ЛГ с данными КПОС ($r=0,83$; $p<0,001$), так и в группе контроля ($r=0,84$; $p<0,001$), но надо отметить, что точность измерений несколько снижается при высоких значениях ЛСС [11].

В дополнение к оценке параметров ЛЖ, ПЖ и легочного кровообращения МРТ позволяет надежно оценивать ремоделирование и жесткость ЛА. От ее эластических свойств зависит сопряжение ЛА с ПЖ: передача пульсовой волны от ПЖ до легочных капилляров, что имеет основополагающее значение для поддержания гемодинамики по всему легочному сосудистому руслу [12]. Процесс реконструкции легочной сосудистой сети приводит к прогрессирующему снижению артериальной эластичности во всех отделах ЛА [13].

Существует несколько параметров жесткости артерий, а именно сопротивляемость, податливость, растяжимость и емкостное сопротивление. Измерение параметров жесткости ЛА может предоставить дополнительную информацию для оценки риска развития тяжелой ЛАГ и смертности, а также для выявления заболевания в начальной стадии. С срДЛА наиболее коррелирует растяжимость ($r=-0,83$; $p<0,001$), а с ЛСС достоверно коррелируют сопротивляемость ($r=-0,57$; $p<0,001$), растяжимость ($r=-0,76$; $p<0,001$), податливость ($r=-0,76$; $p<0,001$) и емкостное сопротивление ($r=-0,78$; $p<0,001$) [14].

Прогностические параметры, получаемые с помощью МРТ

В настоящее время для стратификации риска пациентов с ЛАГ используются параметры, получаемые при КПОС. При выполнении в экспертных центрах процедуры КПОС наблюдается низкая частота осложнений. Тем не менее этот тест является инвазивным, а значит, связан

с реальным риском осложнений. В связи с этим постоянно проводится поиск метода диагностики, который обладал бы сопоставимой информативностью, но являлся бы неинвазивным и безопасным.

Данные МРТ изучались у 438 больных ЛАГ [15]. Подавляющее большинство включенных пациентов (около 85%) имели ИЛГ, наследуемую ЛАГ или ЛАГ, ассоциированную с заболеваниями соединительной ткани. Пациенты с портальной гипертензией и ЛАГ, ассоциированной с врожденными пороками сердца, составили 14%. Около 1% составили пациенты с ВИЧ-инфекцией и с ЛАГ, вызванной наркотиками и токсинами. По результатам исследования фракция выброса (ФВ) ПЖ $> 54\%$ указывала на наличие низкого риска, ФВ ПЖ 54–37% – промежуточного риска и ФВ ПЖ $< 37\%$ – высокого риска 1-летней смертности. Конечнo-систолический объем ПЖ, индексированный по площади поверхности тела и выраженный в процентах, прогнозируемых по возрасту и полу (ИКСО ПЖ%), и конечно-диастолический объем (КДО) ЛЖ использовались для стратификации только в группы низкого и высокого риска. Значения КДО ЛЖ $> 58 \text{ мл/м}^2$ и ИКСО ПЖ% $< 227\%$ указывали на низкий, а КДО ЛЖ $< 58 \text{ мл/м}^2$ и ИКСО ПЖ% $< 227\%$ – на высокий риск 1-летней смертности [15].

По данным метаанализа A. Samer и соавт. (включались исследования с 2007 по 2020 г.), в 12 исследованиях, предоставивших данные о клиническом ухудшении, 218 (33%) событий произошло у 656 участников в среднем за 22,4 мес наблюдения. Клиническое ухудшение определялось как госпитализация по поводу сердечной недостаточности (42%), эскалация терапии (18%), ухудшение ФК по классификации Всемирной организации здравоохранения (3%), снижение переносимости физической нагрузки (2%), потребность в трансплантации легких (2%), неуточненное несмертельное событие (14%) и смерть от всех причин (19%). Объемные и функциональные показатели ПЖ, определенные с помощью МРТ, достоверно предсказывали клиническое ухудшение и смертельный исход. Уменьшение ФВ ПЖ на 1% связано с увеличением риска клинического ухудшения на 4,9% (относительный риск – ОР 0,979 [0,969–0,990]) и смертельного исхода на 2,1% (ОР 0,951 [0,939–0,964]), а увеличение ИКСО ПЖ или ИКДО ПЖ на 1 мл/м² связано с увеличением риска клинического ухудшения на 1,3% (ОР 1,013 [1,008–1,018]) и 1% (ОР 1,010 [1,006–1,013]), а смертельного исхода – на 0,9% (ОР 1,009 [1,005–1,012]) и 0,6% (ОР 1,006 [1,003–1,008]) соответственно [16].

В 2021 г. проведено сравнение трех прогностических моделей: функциональной (пол, возраст, дистанция в тесте 6-минутной ходьбы); гемодинамической (пол, возраст, сатурация венозной крови и среднее давление в правом предсердии по данным КПОС) и визуализационной (пол, возраст, ФВ ПЖ по данным МРТ). Наилучшей оказалась прогностическая модель, основанная на объединении всех трех моделей. Однако различия между моделями являлись минимальными, что подтверждает тот факт, что рутинное наблюдение за пациентами с ЛАГ может проводиться неинвазивно с использованием МРТ [17].

Заключение

ЛАГ – прогрессирующее инвалидизирующее заболевание, опосредованное сложными патофизиологическими механизмами. Основной целью лечения этой категории пациентов является достижение низкого риска летальности по результатам комплексной оценки.

Появление новых методов терапии, совершенствование существующих схем лечения ЛАГ определяют необходи-

мость в изучении точных, предпочтительно неинвазивных методов мониторинга ответа на терапию и проведения стратификации риска. МРТ имеет ряд преимуществ, которые важны для пациентов с ЛАГ. Этот метод является неинвазивным, хорошо воспроизводимым, качество визуализации не зависит от характеристик пациента. В исследовании не используется ионизирующее излучение, что позволяет безопасно применять его повторно. Ключевым преимуществом МРТ является возможность одновременной оценки морфологии и функции ПЖ, ЛЖ и легочного кровообращения.

Множеством современных исследований показано, что МРТ предсказывает клиническое ухудшение и смертность, может использоваться для стратификации риска и даже заменить КПОС в случаях, когда ее применение нецелесообразно или технически невозможно. Это нашло отражение в современных рекомендациях Европейского общества кардиологов и Европейского респираторного общества по диагностике и лечению пациентов с ЛГ, в которых параметры МРТ включены в шкалу стратификации риска летальности пациентов с ЛАГ.

Таким образом, современные данные позволяют ожидать, что в ближайшее время МРТ станет одним из ведущих методов диагностики ЛАГ, позволяющим выбрать тактику лечения, оценить прогноз и осуществлять наблюдение в динамике.

Раскрытие интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Disclosure of interest. The authors declare that they have no competing interests.

Вклад авторов. Авторы декларируют соответствие своего авторства международным критериям ICMJE. Все авторы в равной степени участвовали в подготовке публикации: разработка концепции статьи, получение и анализ фактических данных, написание и редактирование текста статьи, проверка и утверждение текста статьи.

Authors' contribution. The authors declare the compliance of their authorship according to the international ICMJE criteria. All authors made a substantial contribution to the conception of the work, acquisition, analysis, interpretation of data for the work, drafting and revising the work, final approval of the version to be published and agree to be accountable for all aspects of the work.

Источник финансирования. Авторы декларируют отсутствие внешнего финансирования для проведения исследования и публикации статьи.

Funding source. The authors declare that there is no external funding for the exploration and analysis work.

Список сокращений

ДЛА – давление в легочной артерии
 ИКСО ПЖ% – конечно-систолический объем правого желудочка, индексированный по площади поверхности тела и выраженный в процентах, прогнозируемых по возрасту и полу
 ИЛГ – идиопатическая легочная гипертензия
 ИЭ – индекс эксцентриситетности
 КДО – конечно-систолический объем
 КПОС – катетеризация правых отделов сердца
 ЛА – легочная артерия
 ЛАГ – легочная артериальная гипертензия

ЛЖ – левый желудочек
 ЛСС – легочное сосудистое сопротивление
 МЖП – межжелудочковая перегородка
 МРТ – магнитно-резонансная томография
 ОР – относительный риск
 ПЖ – правый желудочек
 срДЛА – среднее давление в легочной артерии
 ФВ – фракция выброса
 ФК – функциональный класс

ЛИТЕРАТУРА/REFERENCES

- Humbert M, Kovacs G, Hoeper MM, et al. 2022 ESC/ERS Guidelines for the diagnosis and treatment of pulmonary hypertension. *Eur Heart J*. 2022;43(38):3618-731. DOI:10.1093/eurheartj/ehac237
- Евразийские клинические рекомендации по диагностике и лечению легочной гипертензии. *Евразийский кардиологический журнал*. 2020;1:78-122 [Eurasian clinical guidelines for the diagnosis and treatment of pulmonary hypertension. *Eurasian Cardiology Journal*. 2020;1:78-122 (in Russian)]. DOI:10.24411/2076-4766-2020-10002
- D'Alonzo GE, Gilbert E. Survival in Patients with Primary Pulmonary Hypertension. *Ann Intern Med*. 1991;115(5):343-9. DOI:10.7326/0003-4819-115-5-343
- Шария А.М., Мартынюк Т. В. Клиническое течение и прогноз у пациентов с идиопатической легочной артериальной гипертензией по данным современных регистров. *Кардиологический вестник*. 2021;16(3):23-7 [Shariya AM, Martynuk TV. Data of modern registries on clinical course and prognosis of patients with idiopathic pulmonary arterial hypertension. *Russian Cardiology Bulletin*. 2021;16(3):23-7 (in Russian)]. DOI:10.17116/Cardiobulletin20211603123
- Dellegrattaglia S, Sanz J, Poon M, et al. Pulmonary hypertension: accuracy of detection with left ventricular septal-to-free wall curvature ratio measured at cardiac MR. *Radiology*. 2007;243(1):63-9. DOI:10.1148/radiol.2431060067
- Белевская А.А., Дадачева З.Х., Саидова М.А., и др. Возможности эхокардиографии в диагностике легочной гипертензии и оценке ремоделирования сердца. *Лечебное дело*. 2015;1:111-21 [Belevskaya AA, Dadacheva ZKh, Saidova MA, et al. The Role of Echocardiography in Diagnosis of Pulmonary Hypertension and Assessment of Heart Remodeling. *Lechebnoe delo*. 2015;1:111-21 (in Russian)].
- Yamasaki Y, Nagao M, Kamitani T, et al. Clinical impact of left ventricular eccentricity index using cardiac MRI in assessment of right ventricular hemodynamics and myocardial fibrosis in congenital heart disease. *Eur Radiol*. 2016;26(10):3617-25. DOI:10.1007/s00330-015-4199-9
- Терновой С.К. Томография сердца. М.: ГЭОТАР-Медиа, 2018 [Ternovoi SK. Tomografiya serdtsa. Moscow: GEOTAR-Media, 2018 (in Russian)].
- Sanz J, Kuschnir P, Rius T, et al. Pulmonary arterial hypertension: noninvasive detection with phase-contrast MR imaging. *Radiology*. 2007;243(1):70-9. DOI:10.1148/radiol.2431060477
- Reiter G, Reiter U, Kovacs G, et al. Blood flow vortices along the main pulmonary artery measured with MR imaging for diagnosis of pulmonary hypertension. *Radiology*. 2015; 275(1):71-9. DOI:10.1148/radiol.14140849
- García-Alvarez A, Fernández-Friera L, Mirelis GJ, et al. Non-invasive estimation of pulmonary vascular resistance with cardiac magnetic resonance. *Eur Heart J*. 2011;32(19):2438-45. DOI:10.1093/eurheartj/ehrl173
- Sanz J, Kariisa M, Dellegrattaglia S. Evaluation of Pulmonary Artery Stiffness in Pulmonary Hypertension With Cardiac Magnetic Resonance. *JACC: Cardiovasc Imag*. 2009;2(3):286-95. DOI:10.1016/j.jcmg.2008.08.007

13. Tan W, Madhavan K, Hunter KS. Vascular stiffening in pulmonary hypertension: cause or consequence? *Pulm Circ.* 2014;4(4):560-80. DOI:10.1086/677370
14. Ray JC, Burger C, Mergo P. Pulmonary arterial stiffness assessed by cardiovascular magnetic resonance imaging is a predictor of mild pulmonary arterial hypertension. *Int J Cardiovasc Imag.* 2019;35(10):1881-92. DOI:10.1007/s10554-018-1397-y
15. Lewis RA, Johns CS, Cogliano M, et al. Identification of cardiac magnetic resonance imaging thresholds for risk stratification in pulmonary arterial hypertension. *Am J Respir Crit Care Med.* 2020;201:458-68. DOI:10.1164/rccm.201909-1771OC
16. Samer A, Yousef S, Pankaj G, et al. Cardiac-MRI Predicts Clinical Worsening and Mortality in Pulmonary Arterial Hypertension. *JACC: Cardiovasc Imag.* 2021;14(5):931-42. DOI:10.1016/j.jcmg.2020.08.013
17. van der Bruggen CE, Handoko ML, Bogaard Harm J, et al. The Value of Hemodynamic Measurements or Cardiac MRI in the Follow-up of Patients With Idiopathic Pulmonary Arterial Hypertension. *CHEST.* 2021;159(4):1575-85. DOI:10.1016/j.chest.2020.10.077

Статья поступила в редакцию / The article received: 16.01.2023



OMNIDOCTOR.RU