

Малев Э. Г.¹, Маликов К. Н.¹, Гончарова Н. С.¹,
Симакова М. А.¹, Карелкина Е. В.¹, Рябков В. А.², Моисеева О. М.¹

¹ ФГБУ «Национальный медицинский исследовательский центр им. В. А. Алмазова» Минздрава России, Санкт-Петербург, Россия

² ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет», Петрозаводск, Россия

ЭХОКАРДИОГРАФИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА ЛЕГОЧНОЙ ГИПЕРТЕНЗИИ: ОТ ПРОСТОГО К СЛОЖНОМУ

Клинические симптомы легочной гипертензии (ЛГ) неспецифичны и обусловлены как высоким давлением в системе легочной артерии, так и прогрессирующей недостаточностью правого желудочка. Инструментальная диагностика легочной артериальной гипертензии (ЛАГ) и хронической тромбоэмболической легочной гипертензии (ХТЭЛГ) сложна и требует использования в диагностическом алгоритме инвазивных и неинвазивных визуализирующих методов, важную роль среди которых играет эхокардиография (ЭхоКГ). При первичном (скрининговом) обследовании ЭхоКГ позволяет оценить вероятность наличия ЛГ, структуру и функцию правых и левых камер сердца, оценить возможные причины повышенного давления в легочной артерии. Эхокардиографическая визуализация постоянно развивается, и измерения, сделанные с использованием новых методов, таких как деформация миокарда, 3D-визуализация, позволяют получить больше информации о правых камерах сердца в экспертном центре, специализирующемся на ведении пациентов с ЛАГ и ХТЭЛГ.

Настоящий обзор направлен на описание параметров и их прогностического значения, используемых для диагностики ЛГ при первичной (скрининговой) ЭхоКГ, так и при обследовании в экспертном центре. Эхокардиографическое обследование пациентов с ЛАГ и ХТЭЛГ представлено согласно этапам их маршрутизации. Представлены расширенные эхокардиографические протоколы первичного (скринингового) обследования и обследования в экспертном центре.

Ключевые слова	Легочная гипертензия; легочная артериальная гипертензия; эхокардиография; деформация миокарда
Для цитирования	Malev E.G., Malikov K.N., Goncharova N.S., Simakova M.A., Karelkina E.V., Ryabkov V.A., Moiseeva O.M. Echocardiography in the Diagnosis of Pulmonary Hypertension: From Basic to Advanced. <i>Kardiologiya</i> . 2025;65(5):58–68. [Russian: Малев Э.Г., Маликов К.Н., Гончарова Н.С., Симакова М.А., Карелкина Е.В., Рябков В.А., Моисеева О.М. Эхокардиографическая диагностика легочной гипертензии: от простого к сложному. <i>Кардиология</i> . 2025;65(5):58–68].
Автор для переписки	Малев Эдуард Геннадиевич. E-mail: edwardmalev@hotmail.com

Введение

Информация о распространенности легочной гипертензии (ЛГ) различных классов в общей популяции имеет крайне ограниченный характер. В структуре ЛГ наиболее частыми вариантами являются ЛГ, ассоциированная с патологией левых камер сердца, и ЛГ, ассоциированная с патологией легких, прежде всего с хронической обструктивной болезнью легких. Однако возможность применения современной таргетной терапии доказана только для двух групп: легочной артериальной гипертензии – ЛАГ (I группа) и неоперабельной/резидуальной хронической тромбоэмболической легочной гипертензии – ХТЭЛГ (IV группа) [1, 2].

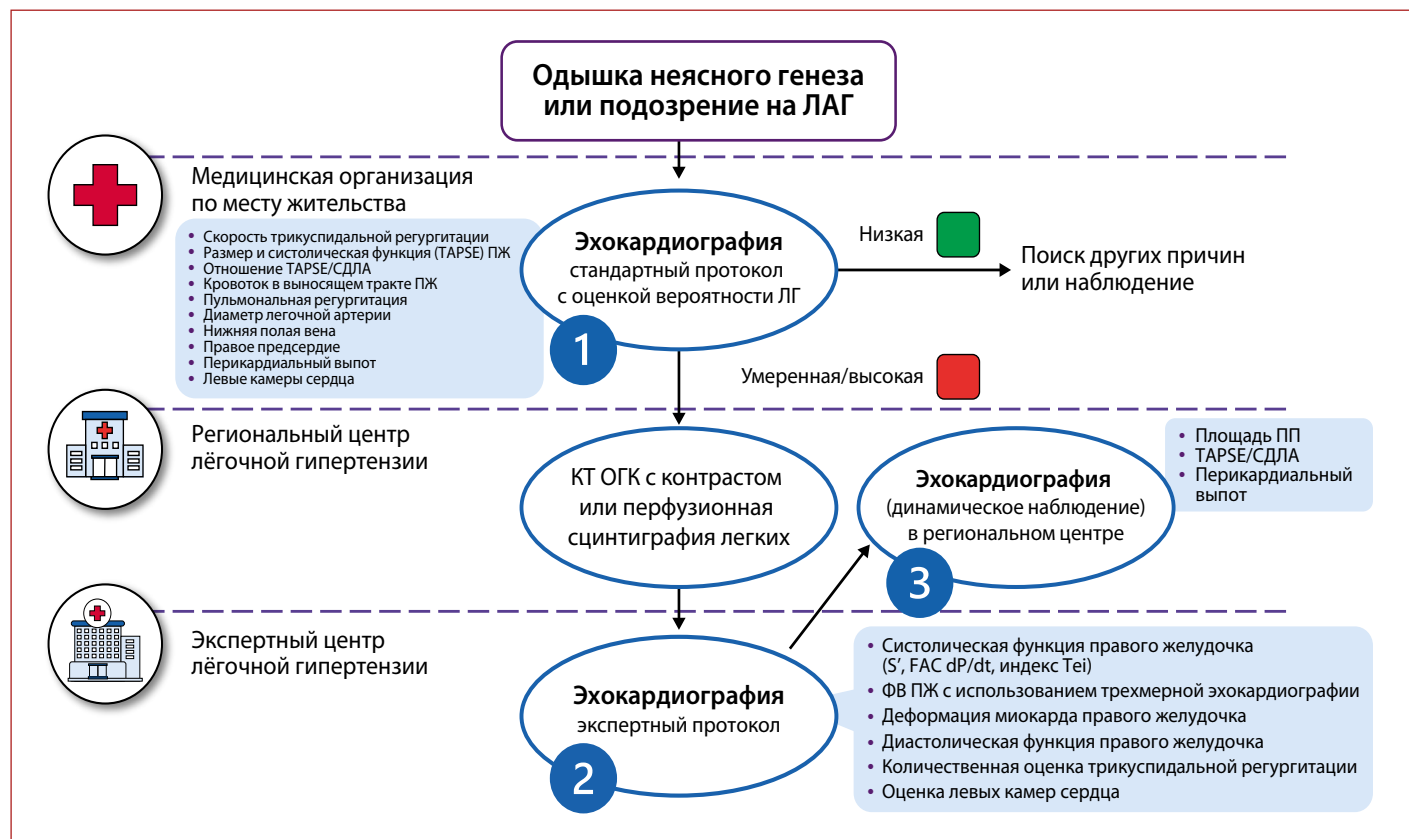
К сожалению, неспецифический характер симптомов ЛАГ/ХТЭЛГ, низкая их распространенность в популяции, а также недостаточная настороженность и отсутствие опыта ведения таких больных специалистами первичного звена затрудняют своевременную диагностику. По данным российского регистра, медиана времени от дебюта симптомов до подтверждения диагноза ЛАГ в референтном центре составляет 52,8 мес [3].

Хотя «золотым стандартом» диагностики ЛГ является инвазивное определение среднего давления в легочной артерии (ЛА) >20 мм рт. ст. в покое по результатам кате-

теризации правых камер сердца (КПКС), именно эхокардиография (ЭхоКГ) широко используется для скрининга ЛГ. Алгоритм диагностики ЛГ, предложенный в клинических рекомендациях «Легочная гипертензия, в том числе хроническая тромбоэмболическая легочная гипертензия», делает ЭхоКГ ключевым инструментальным методом исследования у пациентов с одышкой, позволяющим оценить вероятность наличия ЛГ [2]. В соответствии с рекомендациями основная цель диагностики – это максимально раннее выявление пациентов с ЛГ и обеспечение быстрого направления пациентов с высокой вероятностью ЛАГ/ХТЭЛГ или других форм тяжелой ЛГ в экспертные центры, специализирующиеся на ведении пациентов с ЛГ [4].

Кроме того, согласно этому алгоритму ЭхоКГ является основным инструментом для выявления причин ЛГ, ассоциированной с патологией левых камер сердца и врожденными пороками сердца [2, 5, 6].

И наконец, ЭхоКГ входит в перечень инструментальных методов обследования пациентов с ЛГ в экспертном центре, где новые эхокардиографические методы, такие как деформация миокарда и трехмерная ЭхоКГ, расширяют возможности оценки состояния правых камер сердца для своевременной модификации таргетной терапии.



Цель обзора – познакомить широкий круг специалистов различного профиля с протоколом, используемым в диагностике ЛГ при первичном (скрининговом) эхокардиографическом обследовании, а также возможностями ЭхоКГ в экспертном центре при определении степени дисфункции правого желудочка (ПЖ).

Методология исследования

В обзоре представлен анализ современных клинических исследований, посвященных эхокардиографической диагностике ЛАГ. Анализ литературы проведен в базе данных медицинских публикаций eLIBRARY.ru и PubMed по следующим ключевым словам: легочная гипертензия, эхокардиография. В качестве критериев для отбора статей использованы следующие параметры: соответствие теме обзора литературы; новизна исследований (не старше 8 лет); высокая цитируемость статей; доступность методики в повседневной практике; доказанное влияние анализируемых параметров на прогноз у пациентов с ЛАГ.

Первичное (скрининговое) эхокардиографическое обследование

Основанием для направления пациента на ЭхоКГ в условиях поликлинического звена может быть наличие необъяснимой одышки. Выполнение ЭхоКГ у пациента с клиническим подозрением на ЛГ при первич-

ном скрининговом обследовании помимо корректного определения скорости трикуспидальной регургитации (V_{TR}) и расчета систолического давления в легочной артерии (СДЛА), требует расширения стандартного протокола с включением дополнительных эхокардиографических параметров, повышающих вероятность выявления ЛГ [7–9].

Оценка скорости трикуспидальной регургитации

Именно пиковая скорость трикуспидальной регургитации (ТР), а не СДЛА, рекомендуется в качестве ключевого эхокардиографического параметра для выявления ЛГ в российских и европейских руководствах [1, 2]. Это позволяет избежать мультипликации ошибки измерения V_{TR} (например, при чрезмерном аппаратном усилении яркости изображения или оценке линейных артефактов) для расчета СДЛА при использовании упрощенного уравнения Бернулли ($СДЛА = 4 (V_{TR})^2 + ДПП$), и возможной неточности эхокардиографической оценки давления в правом предсердии (ДПП), основываясь на диаметре и степени коллабироваия нижней полой вены (НПВ) [10, 11].

В рекомендациях ESC/ERS (2022) и РКО (2024) определены критерии вероятности ЛГ, исходя из значений V_{TR} при первичном эхокардиографическом обследовании пациентов с одышкой. Несмотря на обновление гемодинамического определения ЛГ, пороговые значения

V_{TP} , используемые для ее диагностики, остались прежними [12]. При пиковой скорости $TP \leq 2,8$ м/с (соответствует СДЛА менее 35–40 мм рт. ст.), определяющей низкую вероятность ЛГ, показаны поиск других причин одышки и динамическое наблюдение. В случае промежуточной вероятности ЛГ при $V_{TP} 2,9–3,4$ м/с (соответствует СДЛА 40–55 мм рт. ст.) требуется обратить внимание на дополнительные эхокардиографические признаки, тогда как при пиковой $V_{TP} > 3,4$ м/с (соответствует СДЛА более 55 мм рт. ст.) вероятность ЛГ высокая.

Дополнительные эхокардиографические признаки, увеличивающие вероятность ЛГ

Дополнительные эхокардиографические признаки, повышающие вероятность ЛГ, сгруппированы в три категории: «желудочки», «ЛА», «НПВ и правое предсердие (ПП)» (табл. 1). При наличии хотя бы одного показателя из двух разных категорий вероятность ЛГ по результатам измерения V_{TP} повышается – с низкой до средней, и от средней до высокой [1, 2].

Оценка размера правого желудочка

Одним из характерных проявлений ЛАГ при трансторакальной ЭхоКГ является дилатация ПЖ, столь выраженная, что изменяется соотношение размеров желудочков (нормальный размер ПЖ на базальном уровне составляет 25–41 мм и не должен превышать $\frac{2}{3}$ размера левого желудочка – ЛЖ).

Отношение базального диаметра или площади ПЖ/ЛЖ – ЛЖ $> 1,0$ является дополнительным эхокардиографическим параметром ЛГ (см. табл. 1), а соотношение площадей ПЖ и ЛЖ $\geq 0,93$ является предиктором более высокой смертности от всех причин у пациентов с ЛАГ [13].

Измерения обоих желудочков рекомендуется проводить в четырехкамерном сечении, при этом во время измерений следует сохранять строго вертикальную позицию сечения, стараясь получить максимальный размер ПЖ при сохранении видимости верхушки и центральной позиции ЛЖ [10].

Другим изменением при ЛГ является аномальная форма полости ЛЖ, особенно в парастернальном сечении по короткой оси. ПЖ из-за выраженной гипертрофии и дилатации на фоне длительной систолической перегрузки принимает сферическую форму, а межжелудочковая перегородка уплощается. При этом ЛЖ приобретает D-образную форму [14], количественным способом оценки которой является индекс эксцентricности (ИЭ) ЛЖ – соотношение передненижнего и септально-бокового размеров полости ЛЖ в среднеventрикулярном сечении.

Нормальное значение ИЭ ЛЖ не превышает 1, а значение $> 1,1$ является дополнительным эхокардиографическим параметром, повышающим вероятность ЛГ.

Таблица 1. Дополнительные эхокардиографические признаки, увеличивающие вероятность ЛГ [1, 2]

А. Желудочки
• Отношение базального диаметра или площади ПЖ/ЛЖ $> 1,0$ • Уплощение МЖП (индекс эксцентricности ЛЖ в систолу и/или в диастолу $> 1,1$) • Отношение TAPSE/СДЛА $< 0,55$ мм/мм рт. ст.
В. Легочная артерия
• Время ускорения в ВТПЖ < 105 мс или среднесистолическая выемка • Скорость ранней диастолической пульмональной регургитации $> 2,2$ м/с • Диаметр ЛА больше диаметра корня аорты • Диаметр ЛА > 25 мм
С. Нижняя полая вена и правое предсердие
• Диаметр НПВ > 21 мм со сниженным коллабированием на вдохе ($< 50\%$ при резком вдохе или $< 20\%$ при спокойном вдохе) • Площадь ПП (конечная систолическая) > 18 см²

ЛГ – легочная гипертензия; ПЖ – правый желудочек; ЛЖ – левый желудочек; МЖП – межжелудочковая перегородка; TAPSE – амплитуда систолического движения кольца трикуспидального клапана; СДЛА – систолическое давление в легочной артерии; ВТПЖ – выносящий тракт правого желудочка; ЛА – легочная артерия; НПВ – нижняя полая вена; ПП – правое предсердие.

Оценка систолической функции правого желудочка

Оценка систолической функции ПЖ представляет собой сложную задачу, обусловленную анатомическими особенностями данной камеры сердца, не позволяющими определить фракцию выброса (ФВ) ПЖ при двухмерной ЭхоКГ. Поскольку за сокращение миокарда ПЖ отвечают в основном продольные мышечные волокна, идущие от кольца трикуспидального клапана (ТК) к верхушке ПЖ, то сокращение этих волокон приводит к смещению ТК к верхушке ПЖ в систолу. Соответственно, амплитуда систолического движения трикуспидального кольца (TAPSE), измеряемая в М-режиме в четырехкамерной верхушечной проекции, отражает систолическую функцию ПЖ [15].

Продemonстрирована корреляция между TAPSE и ФВ ПЖ, измеренной с помощью магнитно-резонансной томографии (МРТ) [16]. TAPSE < 18 мм связана с неблагоприятным прогнозом и более высокой смертностью у пациентов с ЛАГ [15]. Учитывая простоту и хорошую воспроизводимость измерения TAPSE, малую зависимость от качества изображения и высокую прогностическую ценность, TAPSE рекомендуется определять у всех пациентов с ЛГ для оценки систолической функции ПЖ при первичном эхокардиографическом исследовании [1, 2]. Однако у TAPSE есть недостаток: она зависит от угла сканирования, завышается при укорочении ПЖ в четырехкамерной верхушечной проекции и в случае объемной перегрузки ПЖ [17].

Соотношение двух эхокардиографических параметров – TAPSE и СДЛА – является независимым прогно-

стическим параметром у пациентов с ЛГ. TAPSE/СДЛА неинвазивно оценивает желудочково-артериальное сопряжение и характеризует возможность увеличения сократительной способности ПЖ в ответ на увеличение СДЛА для поддержания нормальной гемодинамики [18, 19]. Снижение параметра TAPSE/СДЛА $<0,55$ мм/мм рт. ст. является дополнительным эхокардиографическим параметром для оценки вероятности ЛГ (см. табл. 1).

Оценка кровотока в выносящем тракте правого желудочка (ВТПЖ)

Независимый метод качественной оценки повышения давления в ЛА основан на измерении времени ускорения (acceleration time, АСТ) легочного кровотока в выносящем тракте ПЖ с помощью импульсно-волновой доплерографии. Это время, необходимое, чтобы кровь, текущая из ПЖ в ЛА, достигла максимальной скорости. Чем выше давление в ЛА, тем быстрее достигается максимальная скорость кровотока и, следовательно, короче АСТ. Время ускорения в ВТПЖ <105 мс является дополнительным эхокардиографическим признаком, указывающим на ЛГ.

Характер кровотока в ВТПЖ со среднесистолической «выемкой», свидетельствующий о снижении выброса из ПЖ в середину систолы из-за высокого СДЛА, служит интегрированным показателем легочного сосудистого сопротивления и функции ПЖ и маркером неблагоприятного исхода у пациентов с ЛАГ [20]. Среднесистолическая «выемка» кровотока в выносящем тракте ПЖ является дополнительным эхокардиографическим признаком, повышающим вероятность ЛГ.

Оценка пульмональной регургитации

У большинства пациентов с ЛГ наблюдается пульмональная регургитация (ПР), возникающая на фоне расширения ствола ЛА и кольца пульмонального клапана. Оценка скорости ранней диастолической ПР позволяет косвенно оценить среднее давление в ЛА. Скорость ранней диастолической ПР, превышающая 2,2 м/с, рассматривается как дополнительный эхокардиографический признак, указывающий на повышенную вероятность наличия ЛГ.

Оценка диаметра легочной артерии

Одним из последствий ЛГ является расширение ствола ЛА, размер которого в отдельных случаях может превышать диаметр корня аорты. Ствол ЛА визуализируется в парастернальной проекции по короткой оси и измеряется на уровне середины расстояния между клапаном ЛА и ее бифуркацией [14]. Расширение ствола ЛА >25 мм или превышение его диаметра над диаметром аорты служит дополнительным эхокардиографическим признаком, повышающим вероятность наличия ЛГ.

Оценка нижней полой вены

Диаметр и степень коллабирования НПВ оцениваются в субкостальной проекции. Нормальный диаметр НПВ колеблется в пределах 15–21 мм, а спадение НПВ на резком вдохе должно превышать 50% (или 20% при спокойном вдохе), что предполагает нормальное давление в ПП (диапазон 0–5 мм рт. ст.). Диаметр НПВ >21 мм и коллабирование $<50\%$ на вдохе предполагают высокое давление в ПП – 15 мм рт. ст., а иные сочетания этих показателей позволяют считать давление в ПП равным 10 мм рт. ст. [20].

Оценка правого предсердия

При оценке размеров правых отделов сердца у пациентов с ЛГ обязательным является определение размеров и площади ПП. Индексированный линейный размер ПП (в норме не превышающий 22 мм/м²) измеряется в четырехкамерной проекции как расстояние между латеральной стенкой ПП и межпредсердной перегородкой в средней части предсердия.

Индексированный объем ПП, превышающий 27 мл/м² у женщин и 32 мл/м² у мужчин, указывает на дилатацию ПП и имеет неблагоприятное прогностическое значение у пациентов с ЛАГ [14]. Однако расчет объема ПП на основе измерений, выполненных только в одной плоскости, снижает точность этого показателя. Поэтому более воспроизводимым и клинически значимым параметром считается площадь ПП. Она измеряется в четырехкамерной проекции в конце систолы, когда наполнение предсердий достигает максимума. Увеличение площади ПП более 18 см² служит дополнительным эхокардиографическим признаком, повышающим вероятность наличия ЛГ.

Оценка выпота в полости перикарда

Обнаружение и количественная оценка перикардального выпота при проведении ЭхоКГ у пациентов с ЛГ имеют важное прогностическое значение. Перикардальный выпот служит независимым предиктором неблагоприятного течения ЛАГ и ассоциирован с повышенной смертностью [21]. Для точного определения максимальной толщины и локализации жидкости рекомендуется использовать четыре стандартные проекции: субкостальную, четырехкамерную, парастернальную длинную и короткую оси. В отсутствие выпота в перикардальной полости не визуализируется свободная жидкость, а листки перикарда плотно прилегают друг к другу. Минимальный выпот характеризуется тонким слоем жидкости (обычно менее 5 мм), который визуализируется в задней части перикардальной полости. Умеренный выпот отличается толщиной слоя жидкости более 5 мм, которая может быть визуализиро-

вана как в задней, так и в передней части перикардиальной полости. Выраженный выпот полностью окружает сердце, при этом у пациентов с тяжелой ЛГ даже при значительном объеме перикардиального выпота могут отсутствовать классические признаки тампонады сердца, такие как диастолический коллапс ПЖ иПП, а также выраженные изменения диастолических скоростей на трикуспидальном (увеличение на 50%) и митральном клапанах (уменьшение на 25%) при вдохе.

Оценка левых камер сердца

Заболевания левых отделов сердца служат причиной более 2/3 случаев ЛГ, причем в большинстве случаев это заболевания, которые приводят к диастолической дисфункции и повышению давления наполнения ЛЖ.

Имеются стандартные эхокардиографические признаки, которые позволяют предположить повышенное давление наполнения ЛЖ (ДНЛЖ) у пациентов с посткапиллярной ЛГ: отношение $E/e' > 15$, индекс объема ЛП $> 34 \text{ мл/м}^2$, индекс массы миокарда ЛЖ $> 115 \text{ г/м}^2$ у мужчин и $> 95 \text{ г/м}^2$ у женщин [22]. Новые рекомендации Британского эхокардиографического общества предлагают обновленные критерии для дифференциальной диагностики пре- и посткапиллярной ЛГ. В качестве основного параметра используется отношение пиков трансмитрального кровотока E/A : значение $\leq 0,8$ указывает на нормальное ДНЛЖ, а значение $\geq 2,0$ свидетельствует о его повышении. В случаях, когда отношение E/A находится в промежуточном диапазоне (0,8–2,0), рекомендуется использовать показатель резервуарного стрейна ЛП (пороговое значение – 16%). Если оценка стрейна недоступна, следует ориентироваться на отношение E/e' : значение < 8 соответствует нормальному ДНЛЖ, а > 13 – повышенному [23].

Наличие систолической дисфункции ЛЖ (ФВ ЛЖ $< 50\%$), умеренной или тяжелой патологии митрального или аортального клапана также позволяет отнести пациента с повышенным СДЛА к ЛГ, ассоциированной с патологией левых отделов сердца.

Надо подчеркнуть, что в большинстве случаев ЭхоКГ позволяет провести дифференциальную диагностику между пре- и посткапиллярной ЛГ, что имеет решающее значение для дальнейшей маршрутизации пациента с ЛАГ.

Оценка перечисленных параметров является непременным условием корректного определения вероятности ЛГ у пациента с одышкой и должна быть выполнена при проведении скринингового эхокардиографического исследования в медицинских учреждениях первого (первичная медико-санитарная помощь со специализированной) и второго (специализированная медицинская помощь) уровней. Корректное определение СДЛА

Таблица 2. Пример эхокардиографического протокола для оценки правых камер сердца, составленный исходя из рекомендаций РКО (2024) и ESC/ERS (2022)

Скорость ТР и расчетное СДЛА:
• Скорость ТР: ____ м/с
• Макс. градиент ТР: ____ мм рт. ст.
• СДЛА: ____ мм рт. ст.
Правый желудочек:
• Базальный размер ПЖ: ____ мм
• Соотношение базальных диаметров или площадей ПЖ/ЛЖ: ____
• Индекс эксцентричности ЛЖ (в систолу или в диастолу): ____
• Толщина стенки ПЖ: ____ мм
• TAPSE: ____ мм
• Отношение TAPSE/СДЛА: ____ мм/мм рт. ст.
Легочная артерия:
• Диаметр ЛА: ____ мм
• Соотношение диаметров ЛА и корня аорты: ____
Пульмональный клапан:
• Время ускорения потока в выносящем тракте ПЖ: ____ мс
• Феномен среднесистолической выемки: да/нет
• Скорость ранней диастолической пульмональной регургитации: ____ м/с
Правое предсердие:
• ПлощадьПП: ____ см ²
Нижняя полая вена:
• НПВ выдох: ____ мм
• НПВ вдох: ____ мм
• Спадение НПВ: ____ %
Перикардиальный выпот:
• Расхождение листков перикарда в конце диастолы: за задней стенкой ЛЖ: ____ мм
• Перед свободной стенкой ПЖ: ____ мм
• В конце систолы: за правым предсердием: ____ мм

Данный протокол дополняет стандартный эхокардиографический протокол с оценкой состояния левых и правых камер сердца. ТР – трикуспидальная регургитация; СДЛА – систолическое давление в легочной артерии; ПЖ – правый желудочек; ЛЖ – левый желудочек; TAPSE – амплитуда систолического движения кольца трикуспидального клапана; ЛА – легочная артерия;ПП – правое предсердие; НПВ – нижняя полая вена.

и определение дополнительных эхокардиографических параметров, особенно отражающих превалирование размеров правых камер над левыми, наличие дисфункции миокарда ПЖ могут стать основанием для направления пациента в референсный центр ЛГ для выполнения КПКС и верификации диагноза [1, 2]. Пример расширенного эхокардиографического протокола оценки правых камер сердца, составленный исходя из рекомендаций РКО (2024) и ESC/ERS (2022), приведен в таблице 2.

При высокой вероятности ЛГ, выявленной в ходе скринингового эхокардиографического обследования, следует направить пациента (I класс показаний) в специализированный экспертный центр, базирующийся в медицинских учреждениях третьего или четвертого (высокотехнологическая медицинская помощь) уровней, для дополнительного обследования [2, 6].

Эхокардиографическое обследование в экспертном центре, специализирующемся на ведении пациентов с ЛАГ/ХТЭЛГ

Исследование проводится с использованием ЭхоКГ экспертного класса, специалистами с большим опытом в оценке пациентов с ЛГ. Как правило, таким пациентам ранее выполнена КПКС, и задача ЭхоКГ состоит в определении степени дисфункции ПЖ, а также уточнении прогноза для пациента с помощью мультипараметрических расчетных показателей.

Оценка систолической функции правого желудочка

Еще одним линейным параметром для оценки систолической функции ПЖ является систолическая скорость движения кольца ТК (S'), оцениваемая с помощью тканевой доплерографии (ТД). Необходимо корректное размещение контрольного объема в импульсном тканевом доплеровском режиме на латеральной части кольца ТК в четырехкамерной верхушечной проекции, при этом луч доплеровского сигнала должен быть параллелен направлению движения латеральной части кольца ТК. Значения S' снижаются у пациентов с ЛАГ, а ее снижение ниже 10 см/с тесно ассоциировано с систолической дисфункцией ПЖ [10].

В отличие от ЛЖ, измерение ФВ ПЖ с использованием двухмерного метода невозможно из-за его сложной трехмерной формы. Аналогом ФВ ПЖ служит фракционное изменение площади (Fractional area change, FAC). Этот параметр, обладающий доказанной клинической значимостью, служит прогностическим маркером развития сердечной недостаточности и внезапной сердечной смерти у пациентов с ЛАГ. FAC рассчитывается как разница между конечной диастолической и конечной систолической площадью ПЖ в четырехкамерной верхушечной проекции по формуле:

$$\frac{\text{конечная диаст. } S - \text{конечная сист. } S}{\text{конечная диаст. } S} \times 100.$$

В норме этот показатель должен превышать 35%, а более низкие значения свидетельствуют о систолической дисфункции ПЖ [10]. Согласно рекомендациям Британского эхокардиографического общества, отклонением от нормы считается FAC <30% у мужчин и <35% у женщин [7].

Параметр dP/dt – показатель скорости повышения давления в систолу в ПЖ – еще один метод оценки систолической функции ПЖ. Для измерения параметра dP/dt необходимо визуализировать четкий контур ТР с помощью непрерывно-волновой доплерографии и измерить время достижения скорости в 1 и 3 м/с. Отношение dP/dt тесно ассоциировано с ФВ ПЖ, измеренной с помощью МРТ – значение dP/dt ниже 400 мм рт. ст./с указывает на сниженную ФВ ПЖ [24]. Кроме того, сни-

жение dP/dt является значимым TAPSE-независимым маркером неблагоприятного течения ЛАГ и ХТЭЛГ [10].

Доплеровский индекс производительности миокарда (индекс Tei) представляет собой количественный метод оценки глобальной систолической и диастолической функции миокарда и используется для оценки функции ПЖ у пациентов с ЛАГ. Он представляет собой сумму времени изоволюметрического сокращения и расслабления ПЖ, отнесенную к продолжительности выброса ПЖ, – $(IVRT + IVCT)/ET$. Его величина не зависит от геометрии желудочка, частоты сердечных сокращений, преднагрузки или тяжести ТР. Для пациентов с ЛАГ характерно повышение индекса $Tei >0,40$ для импульсной и $>0,55$ для ТД [7]. Для оценки индекса Tei с помощью импульсно-волновой доплерографии необходимо измерение продолжительности транстрикуспидального кровотока в диастолу на уровне кончиков створок ТК и времени выброса ПЖ чуть ниже створок клапана ЛА. При оценке с помощью ТД регистрируется движение латеральной части кольца ТК. Преимуществом данного метода является возможность произвести измерения в одной проекции и за один сердечный цикл. Этот индекс не следует определять у пациентов с фибрилляцией предсердий, аортальным стенозом и нарушением внутривентрикулярной проводимости.

Комплексная эхокардиографическая оценка ПЖ, включающая измерения TAPSE, S' , FAC, dP/dt и индекса Tei , позволяет объективно определить степень его систолической дисфункции. Это особенно важно, поскольку выживаемость у пациентов с ЛАГ тесно ассоциирована с функцией ПЖ, а правожелудочковая недостаточность служит основной причиной летального исхода.

Трехмерная эхокардиография в оценке функции правого желудочка

Развитие трансторакальной ЭхоКГ, включая широкое внедрение трехмерных датчиков, сделало возможным оценку ФВ ПЖ с использованием трехмерной ЭхоКГ (3D ФВ ПЖ). Этот метод обеспечивает более точные и воспроизводимые измерения объемов и ФВ ПЖ по сравнению с традиционной двухмерной ЭхоКГ. Для проведения измерений рекомендуется применять функцию автоматического определения границ эндокарда [7]. Значения 3D ФВ ПЖ ниже 45% свидетельствуют о его систолической дисфункции [25]. Однако использование этого метода ограничено из-за недостаточной доступности трехмерных датчиков, зависимости от качества визуализации, сложности получения изображений при увеличенных объемах ПЖ и нестабильной частоте сердечных сокращений.

Оценка деформации миокарда правого желудочка

Визуальная оценка сократительной способности ПЖ является субъективной и требует от специалиста зна-

чительного опыта. Методы постобработки эхокардиографических изображений, такие как «speckle tracking» (отслеживание движения неоднородностей миокарда в течение сердечного цикла), позволяют объективно оценить сегментарную и глобальную систолическую функцию ПЖ [26, 27]. Деформация миокарда представляет собой процент изменения расстояния между двумя точками миокарда в систолу по сравнению с исходным изменением в диастолу, а скорость деформации отражает скорость изменения этого расстояния и измеряется в с^{-1} . Наибольшее клиническое применение получила продольная деформация (ПД) ПЖ [28]. Нормальные значения систолической глобальной ПД ПЖ у здоровых людей составляют: $-23,4\%$ (от $-24,2$ до $-22,6\%$), а для свободной стенки ПЖ: $-26,9\%$ (от $-28,0$ до $-25,9\%$) [29]. Исследования показали, что у пациентов с ЛАГ глобальная систолическая ПД ПЖ и скорость деформации значительно снижены, а уменьшение деформации свободной стенки ПЖ связано с ухудшением выживаемости [30].

Метод оценки деформации миокарда обладает важным преимуществом: он позволяет проводить точный анализ функции отдельных сегментов миокарда, что дает возможность выявлять локальные нарушения и обнаруживать ранние стадии систолической дисфункции, которые остаются незаметными при использовании традиционной ЭхоКГ [31]. Возможна также оценка деформации другой камеры сердца – ПП. Снижение показателей деформации ПП в динамике коррелирует с клиническим ухудшением у пациентов с ЛАГ, а ухудшение деформации ПП на фоне лечения связано с менее благоприятным прогнозом по сравнению с теми случаями, когда деформация ПП остается стабильной или демонстрирует улучшение [32].

Новым и более точным методом является оценка ПД ПЖ с помощью трехмерной ЭхоКГ (3D ПД ПЖ). Нормальные ее значения составляют $-22,1 \pm 2,5\%$, при этом у пациентов с легкой ЛАГ они снижаются до $-18,9 \pm 6,9\%$, при умеренной – до $-15,2 \pm 6,1\%$, а при тяжелой – до $-11,5 \pm 5,0\%$. Снижение 3D ПД ПЖ служит предиктором неблагоприятного прогноза у пациентов с ЛАГ. Кроме того, 3D ПД ПЖ может выявить недостаточный ответ на медикаментозную терапию и помочь стратифицировать риск в тех случаях, когда традиционные эхокардиографические параметры функции ПЖ неоднозначны [28].

В целом клиническое применение speckle tracking и 3D ПД ПЖ ограничено сложностью выполнения, зависимостью от качества визуализации и недоступностью оборудования в ряде экспертных и региональных центров ЛАГ. Несмотря на высокую точность, эти методы требуют стандартизации и более широкого внедрения для клинического использования.

Оценка диастолической функции правого желудочка

Вследствие систолической перегрузки ПЖ у пациентов с ЛГ развивается не только гипертрофия, но и фиброз миокарда, что приводит к нарушению диастолической функции ПЖ [33]. Для оценки диастолической функции ПЖ используются параметры транстрикуспидального кровотока: отношение скоростей волн E/A и время замедления волны E [34]. Отношение E/A менее $0,8$ свидетельствует о нарушении релаксации миокарда ПЖ [33]. По мере повышения ригидности ПЖ конечное диастолическое давление в его полости увеличивается, что вызывает псевдонормализацию транстрикуспидального кровотока за счет увеличения скорости волны E [7]. Отношение $E/A > 2,1$ вместе со временем замедления волны $E < 120$ мс указывает на рестриктивный тип наполнения ПЖ.

ТД дает возможность оценить релаксацию ПЖ, измеряя диастолические скорости движения латеральной части кольца ТК: раннюю (e') и позднюю (a'). В норме преобладает ранняя диастолическая волна, а отношение e'/a' превышает 1 . При нарушении релаксации ПЖ это соотношение снижается и остается меньше 1 на различных стадиях развития диастолической дисфункции ПЖ [33]. Отношение $E/e' > 6$ при E/A транстрикуспидального кровотока в диапазоне от $0,8$ до $2,1$ указывает на псевдонормальный тип наполнения ПЖ.

Трикуспидальный клапан и трикуспидальная регургитация

Прогрессирующее ремоделирование ПЖ при ЛГ приводит к расширению и уплощению кольца ТК, а также натяжению его хорд. Это вызывает натяжение створок и их неполное смыкание в систолу, что способствует развитию функциональной (вторичной) ТР [34]. Степень повышения СДЛА является ключевым фактором, определяющим тяжесть вторичной ТР у пациентов с ЛГ. ТР наблюдается у $96,5\%$ пациентов с ЛАГ, причем у 60% из них она имеет умеренную или тяжелую степень [35]. В отсутствие струи ТР вероятность ЛГ следует оценивать на основе клинической картины с учетом других эхокардиографических признаков перегрузки давлением ПЖ (см. табл. 1). У пациентов с приклапанной струей ТР или недостаточно четкой визуализацией можно рассмотреть возможность внутривенного введения вспененного физиологического раствора или контрастного вещества для улучшения качества доплеровского сигнала и измерения пиковой скорости ТР. Однако если клинические подозрения на ЛГ сохраняются, а эхокардиографическая оценка затруднена, рекомендуется инвазивное измерение давления в ЛА [1, 2].

Оценка тяжести ТР при ЭхоКГ проводится с использованием количественных методов, таких как измерение объема и площади эффективного отверстия регургита-

ции. Однако из-за значительных колебаний радиуса PISA в зависимости от фазы дыхания требуется усреднение нескольких измерений [36].

Тяжелая ТР имеет неблагоприятное долгосрочное прогностическое значение у пациентов с ЛАГ. Наличие тяжелой ТР у пациентов с впервые диагностированной ЛАГ связано с ухудшением течения заболевания, включая клинические проявления, функциональный статус и эхокардиографические параметры правых отделов сердца [35].

Оценка левых камер сердца

В качестве показателя, помогающего дифференцировать прекапиллярную ЛГ от ЛГ вследствие патологии левых отделов сердца, предложено использовать со-

отношение пиковой скорости ТР и E/e' ЛЖ – ePLAR. В контрольной группе с нормальными значениями V_{TR} и E/e' показатель ePLAR составляет $0,30 \pm 0,09$ м/с. У пациентов с ЛАГ, с повышением СДЛА на фоне нормальной диастолической функции ЛЖ ePLAR увеличивается до $0,44 \pm 0,22$ м/с. В то же время у пациентов с патологией левых отделов сердца, где менее высокое СДЛА сочетается с повышенными значениями E/e' , ePLAR снижается до $0,20 \pm 0,11$ м/с [37].

Теоретически у пациентов с ЛАГ структура и функция ЛЖ должны оставаться нормальными. Однако поскольку МЖП является общей для обоих желудочков и находится в пределах одного перикардального мешка, систолическая перегрузка ПЖ приводит к смещению перегородки в сторону ЛЖ. Это изменяет геометрию ЛЖ, снижает его диастолическое наполнение, усугубляет сердечную недостаточность и ухудшает прогноз у пациентов с ЛАГ [38]. Кроме того, у пациентов с ЛАГ наблюдается ухудшение деформации ЛЖ, а снижение легочного сосудистого сопротивления способствует улучшению деформации не только ПЖ, но и ЛЖ [39].

Приведенные показатели должны быть включены в эхокардиографическое заключение пациента с ЛАГ в экспертном центре (табл. 3).

Расширенный мультипараметрический протокол эхокардиографической оценки правых отделов сердца в экспертных центрах обладает рядом преимуществ. Во-первых, он повышает диагностическую точность: использование дополнительных параметров позволяет более детально оценить функцию ПЖ и степень ее нарушения. Во-вторых, он способствует объективизации результатов: современные методы, такие как speckle tracking и трехмерная визуализация (3D), снижают субъективность оценок и повышают воспроизводимость результатов при повторных исследованиях.

Эхокардиографическое исследование в динамике

Отдельные эхокардиографические показатели, такие как TAPSE/СДЛА, площадь ПП и наличие перикардального выпота, включены в прогностические модели (критерии риска ESC/ERS 2022) для стратификации пациентов на группы низкого, среднего и высокого риска смерти (табл. 4). Повышение TAPSE, уменьшение площади ПП и отсутствие выпота в перикарде являются признаками обратного ремоделирования, коррелируют с улучшением выживаемости. Они также используются не только для начальной стратификации, но и для оценки эффективности проводимой терапии через 3–6 мес, а затем через 6–12 мес или ранее при ухудшении. Эти параметры являются ключевыми, но не единственными признаками изменения прогноза пациента. Уменьшение

Таблица 3. Расширенный мультипараметрический протокол эхокардиографической оценки правых камер сердца в экспертном центре

Систолическая функция правого желудочка
• S' : ____ см/с
• FAC: ____ %
• Tei (TDI): ____
• dP/dt : ____ мм рт. ст./с
Трехмерная эхокардиография правого желудочка
• КДО: ____ мл
• КСО: ____ мл
• УО: ____ мл
• ФВ: ____ %
Деформация миокарда правого желудочка
• Продольная деформация ПЖ: ____ %
• Продольная деформация свободной стенки ПЖ: ____ %
• 3D продольная деформация ПЖ: ____ %
Диастолическая функция правого желудочка
• E/A : ____
• DT: ____ мс
• E/e' : ____
Трикуспидальный клапан
• Диаметр кольца: ____ мм
• Высота коаптации: ____ мм
Трикуспидальная регургитация
• Объем: ____ мл
• ERO: ____ cm^2
• Фракция регургитации: ____ %
• vena contracta: ____ мм
Соотношение пиковой скорости ТР и E/e' ЛЖ
• (ePLAR): ____ м/с

S' – систолическая скорость движения латеральной части фиброзного кольца трикуспидального клапана; FAC – фракционное изменение площади, Fractional area change; Tei (TDI) – доплеровский индекс производительности миокарда ПЖ; dP/dt – показатель скорости повышения давления в систолу в ПЖ; КДО – конечный диастолический объем; КСО – конечный систолический объем; УО – ударный объем; ФВ – фракция выброса; ПЖ – правый желудочек, E/A – отношение максимальных скоростей транстрикуспидального кровотока в раннюю и позднюю диастолу; DT – время замедления раннего диастолического наполнения транстрикуспидального кровотока; E/e' – отношение скорости транстрикуспидального кровотока в раннюю диастолу к скорости движения латеральной части фиброзного кольца трикуспидального клапана; ERO – эффективное отверстие регургитации; ТР – трикуспидальная регургитация.

Таблица 4. Эхокардиографические критерии риска летальности у пациентов с ЛАГ* [1, 2]

Эхокардиографический показатель	Риск смерти (расчетная смертность в течение 1 года)		
	низкий (<5%)	промежуточный (5–20%)	высокий (>20%)
Площадь ПП, см ²	<18	18–26	>26
TAPSE/СДЛА, мм/мм рт. ст.	>0,32	0,19–0,32	<0,19
Перикардиальный выпот	Отсутствует	Минимальный	Умеренный или выраженный

* – за исключением пациентов с некорригированными врожденными пороками сердца. ЛАГ – легочная артериальная гипертензия; ПП – правое предсердие; СДЛА – систолическое давление в легочной артерии; TAPSE – систолическая экскурсия плоскости кольца трикуспидального клапана.

размеров, площадей и объемов правых камер, улучшение систолической и диастолической функции ПЖ, оцененное с использованием различных показателей, в совокупности указывают на улучшение прогноза у пациента с ЛАГ на фоне терапии.

Недавно предложена шкала REVEAL-ECHO, включившая оценку тяжести дилатации ПЖ, снижения систолической функции ПЖ, тяжести ТР и перикардиального выпота [40]. Однако у этой шкалы есть недостатки: она основана на ретроспективном анализе данных исследования в подгруппах регистра REVEAL, а также предполагает субъективную оценку тяжести указанных эхокардиографических параметров без четких критериев их градации.

Тем не менее имеющиеся прогностические шкалы на основе эхокардиографических параметров представляют мощный инструмент для стратификации риска у пациентов с ЛАГ. Они позволяют оценить тяжесть состояния, выбрать оптимальную тактику лечения и прогнозировать исходы, что делает их неотъемлемой частью ведения пациентов.

Заключение

Значительная временная задержка между появлением симптомов и установлением точного диагноза ЛАГ остается нерешенной проблемой. Это имеет серьезные клинические последствия, поскольку раннее выявление заболевания, когда пациент еще находится в группе низкого риска, связано с лучшим прогнозом и более эффективным ответом на лечение. Поэтому высокая настороженность врачей первичного звена и соблюдение алгоритма скрининговой эхокардиографической диагностики легочной гипертензии являются ключевыми факторами успеха последующей таргетной терапии легочной артериальной гипертензии и неоперабельной/резидуальной хронической тромбоэмболической легочной гипертензии. При проведении обычной эхокардиографии у пациентов с подозрением на легочную гипертензию реко-

мендуется использовать простые и воспроизводимые параметры, такие как соотношение размеров правого и левого желудочков, систолическая экскурсия плоскости кольца трикуспидального клапана (TAPSE) и отношение систолическая экскурсия плоскости кольца трикуспидального клапана/систолическое давление в легочной артерии (TAPSE/СДЛА).

При обследовании пациентов в экспертном центре рекомендуется использовать более точные и сложные методы оценки, такие как деформация миокарда и 3D-визуализация, для раннего выявления признаков дезадаптивного ремоделирования правых камер сердца. Поэтапность в обследовании пациентов с подозрением на легочную артериальную гипертензию/хроническую тромбоэмболическую легочную гипертензию (от лечебного учреждения по месту жительства до экспертного центра) позволит максимально сократить путь пациента от момента появления симптомов заболевания до выполнения катетеризации правых камер сердца и назначения таргетной терапии или интервенционного вмешательства.

Наряду с этим регулярное эхокардиографическое наблюдение пациентов с легочной артериальной гипертензией/хронической тромбоэмболической легочной гипертензией на фоне терапии позволяет мониторировать состояние правых камер сердца и своевременно проводить эскалацию специфической терапии.

Финансирование

Статья подготовлена при поддержке АО «БАЙЕР».

Конфликт интересов

Статья подготовлена при поддержке АО «БАЙЕР».

COM-ADE-RUS-05.2025-385-1

Статья поступила 02.03.2025

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Humbert M, Kovacs G, Hoeper MM, Badagliacca R, Berger RMF, Brida M et al. 2022 ESC/ERS Guidelines for the diagnosis and treatment of pulmonary hypertension. European Heart Journal. 2022;43(38):3618–731. DOI: 10.1093/eurheartj/ehac237

2. Avdeev S.N., Barbarash O.L., Valieva Z.S., Volkov A.V., Veselova T.N., Galyavich A.S. et al. 2024 Clinical practice guidelines for Pulmonary hypertension, including chronic thromboembolic pulmonary hypertension. Russian Journal of Cardiology. 2024;29(11):1–81. [Russian:

- Авдеев С.Н., Барбараш О.А., Валиева З.С., Волков А.В., Веселова Т.Н., Галявич А.С. и др. Легочная гипертензия, в том числе хроническая тромбоэмболическая легочная гипертензия. Клинические рекомендации 2024. Российский кардиологический журнал. 2024;29(11):1-81]. DOI: 10.15829/1560-4071-2024-6161
3. Chazova I.E., Martynyuk T.V., Valieva Z.S., Gratsianskaya S.E., Aleevskaya A.M., Zorin A.V. et al. Clinical and Instrumental Characteristics of Newly Diagnosed Patients with Various Forms of Pulmonary Hypertension according to the Russian National Registry. *BioMed Research International*. 2020;1:6836973. DOI: 10.1155/2020/6836973
4. Ryabkov V.A., Vezikova N.N., Goncharova N.S., Simakova M.A., Moiseeva O.M. Principles of healthcare management for patients with pulmonary hypertension: focus on continuity. *Russian Journal of Cardiology*. 2023;28(2):75-81. [Russian: Рябков В.А., Везикова Н.Н., Гончарова Н.С., Симакова М.А., Моисеева О.М. Принципы организации медицинской помощи пациентам с легочной гипертензией: фокус на преемственность. Российский кардиологический журнал. 2023;28(2):75-81]. DOI: 10.15829/1560-4071-2023-5335
5. Nikolaeva E.A., Martynyuk T.V. New criteria for diagnosis of pulmonary arterial hypertension: pros and cons. *Systemic Hypertension*. 2023;20(2):21-7. [Russian: Николаева Е.А., Мартынюк Т.В. Новые диагностические критерии легочной артериальной гипертензии: за и против. Системные гипертензии. 2023;20(2):21-7]. DOI: 10.38109/2075-082X-2023-2-21-27
6. Saidova M.A., Loskutova A.S., Belevskaya A.A., Stukalova O.V. The assessment of right ventricular structure and function in patients with different cardiovascular diseases using modern echocardiographic technologies and magnetic resonance imaging. *Therapeutic Archive*. 2020;92(9):24-9. [Russian: Саидова М.А., Лоскутова А.С., Белевская А.А., Стукалова О.В. Состояние правого желудочка сердца при различной сердечно-сосудистой патологии по данным комплексной оценки с использованием современных эхокардиографических технологий и магнитно-резонансной томографии. Терапевтический архив. 2020;92(9):24-9]. DOI: 10.26442/00403660.2020.09.000507
7. Zaidi A, Knight DS, Augustine DX, Harkness A, Oxborough D, Pearce K et al. Echocardiographic Assessment of the Right Heart in Adults: A Practical Guideline from the British Society of Echocardiography. *Echo Research & Practice*. 2020;7(1):G19-41. DOI: 10.1530/ERP-19-0051
8. Kyzymly A.V., Ryzhkov A.V., Simakova M.A., Kozlyonok A.V., Naimushin A.V., Moiseeva O.M. Value of Two Dimensional Echocardiography for Assessment of Disease Severity in Patients With Pulmonary Hypertension. *Kardiologia*. 2016;56(1):25-30. [Russian: Казымлы А.В., Рыжков А.В., Симакова М.А., Козленок А.В., Наймушин А.В., Моисеева О.М. Значение двухмерной эхокардиографии в оценке степени тяжести больных легочной гипертензией. Кардиология. 2016;56(1):25-30]. DOI: 10.18565/cardio.2016.1.25-30
9. Chazova I.E., Martynyuk T.V., Gorbachevskii S.V., Gramovich V.V., Danilov N.M., Panchenko E.P. et al. 'Guiding lights' for the diagnosis of chronic thromboembolic pulmonary hypertension in the flow of patients with pulmonary embolism. *Therapeutic Archive*. 2022;94(9):1052-6. [Russian: Чазова И.Е., Мартынюк Т.В., Горбачевский С.В., Грамович В.В., Данилов Н.М., Панченко Е.П. и др. «Путеводные огни» диагностики хронической тромбоэмболической легочной гипертензии в потоке пациентов, перенесших тромбоэмболию легочной артерии. Терапевтический архив. 2022;94(9):1052-6]. DOI: 10.26442/00403660.2022.09.201836
10. Topyla-Putowska W, Tomaszewski M, Wysokiński A, Tomaszewski A. Echocardiography in Pulmonary Arterial Hypertension: Comprehensive Evaluation and Technical Considerations. *Journal of Clinical Medicine*. 2021;10(15):3229. DOI: 10.3390/jcm10153229
11. Alekhin M.N. Possibilities and limitations of echocardiography in evaluation of pulmonary vascular resistance. *Ultrasound & Functional Diagnostics*. 2019;1:53-63. [Russian: Алехин М.Н. Возможности и ограничения эхокардиографии в оценке легочного сосудистого сопротивления. Ультразвуковая и функциональная диагностика. 2019;1:53-63]. DOI: 10.24835/1607-0771-2019-1-53-63
12. Gall H, Yogeswaran A, Fuge J, Sommer N, Grimminger F, Seeger W et al. Validity of echocardiographic tricuspid regurgitation gradient to screen for new definition of pulmonary hypertension. *EClinicalMedicine*. 2021;34:100822. DOI: 10.1016/j.eclinm.2021.100822
13. Celestin BE, Bagherzadeh SP, Ichimura K, Santana EJ, Sanchez PA, Tobore T et al. Identifying consistent echocardiographic thresholds for risk stratification in pulmonary arterial hypertension. *Pulmonary Circulation*. 2024;14(2):e12361. DOI: 10.1002/pul2.12361
14. Jang AY, Shin M-S. Echocardiographic Screening Methods for Pulmonary Hypertension: A Practical Review. *Journal of Cardiovascular Imaging*. 2020;28(1):1-9. DOI: 10.4250/jcvi.2019.0104
15. Alerhand S, Hickey SM. Tricuspid Annular Plane Systolic Excursion (TAPSE) for Risk Stratification and Prognostication of Patients with Pulmonary Embolism. *The Journal of Emergency Medicine*. 2020;58(3):449-56. DOI: 10.1016/j.jemermed.2019.09.017
16. Hoette S, Creuzé N, Günther S, Montani D, Savale L, Jais X et al. RV Fractional Area Change and TAPSE as Predictors of Severe Right Ventricular Dysfunction in Pulmonary Hypertension: A CMR Study. *Lung*. 2018;196(2):157-64. DOI: 10.1007/s00408-018-0089-7
17. Zhao H, Kang Y, Pickle J, Wang J, Han Y. Tricuspid annular plane systolic excursion is dependent on right ventricular volume in addition to function. *Echocardiography*. 2019;36(8):1459-66. DOI: 10.1111/echo.14439
18. Belevskaya A.A., Saidova M.A., Martynyuk T.V., Chazova I.E. Heart remodeling and ventricular-arterial coupling in patients with IPAH and CTEPH. *Russian Cardiology Bulletin*. 2018;13(4):30-4. [Russian: Белевская А.А., Саидова М.А., Мартынюк Т.В., Чазова И.Е. Ремоделирование сердца и сердечно-сосудистое сопряжение у пациентов с идиопатической и хронической тромбоэмболической легочной гипертензией. Кардиологический вестник. 2018;13(4):30-4]. DOI: 10.17116/Cardiobulletin20181304130
19. Mareyeva V.A., Klimenko A.A., Shostak N.A. Pulmonary hypertension and heart failure: alternative indexes of right ventricular-pulmonary artery coupling. *Rational Pharmacotherapy in Cardiology*. 2023;19(4):398-402. [Russian: Мареева В.А., Клименко А.А., Шостак Н.А. Легочная гипертензия и хроническая сердечная недостаточность: альтернативные индексы правожелудочково-артериального сопряжения. Рациональная Фармакотерапия в Кардиологии. 2023;19(4):398-402]. DOI: 10.20996/1819-6446-2023-2929
20. Augustine DX, Coates-Bradshaw LD, Willis J, Harkness A, Ring L, Grapsa J et al. Echocardiographic assessment of pulmonary hypertension: a guideline protocol from the British Society of Echocardiography. *Echo Research & Practice*. 2018;5(3):G11-24. DOI: 10.1530/ERP-17-0071
21. Vasquez MA, Iskander M, Mustafa M, Quintero-Martinez JA, Luna A, Mintz J et al. Pericardiocentesis Outcomes in Patients With Pulmonary Hypertension: A Nationwide Analysis from the United States. *The American Journal of Cardiology*. 2024;210:232-40. DOI: 10.1016/j.amjcard.2023.10.047
22. D'Alto M, Romeo E, Argiento P, Pavelescu A, Mélot C, D'Andrea A et al. Echocardiographic Prediction of Pre- versus Postcapillary Pulmonary Hypertension. *Journal of the American Society of Echocardiography*. 2015;28(1):108-15. DOI: 10.1016/j.jecho.2014.09.004
23. Robinson S, Ring L, Oxborough D, Harkness A, Bennett S, Rana B et al. The assessment of left ventricular diastolic function: guidance and recommendations from the British Society of Echocardiography. *Echo Research & Practice*. 2024;11(1):16. DOI: 10.1186/s44156-024-00051-2
24. Wu VC-C, Takeuchi M. Echocardiographic assessment of right ventricular systolic function. *Cardiovascular Diagnosis and Therapy*. 2018;8(1):70-9. DOI: 10.21037/cdt.2017.06.05
25. Wang S, Wang S, Zhu Q, Wang Y, Li G, Kong F et al. Reference Values of Right Ventricular Volumes and Ejection Fraction by Three-Dimensional Echocardiography in Adults: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Frontiers in Cardiovascular Medicine*. 2021;8:709863. DOI: 10.3389/fcvm.2021.709863
26. Surkova E.A., Kovács A. Comprehensive Echocardiographic Assessment of the Right Ventricular Performance: beyond TAPSE and Fractional Area Change. *Russian Journal of Cardiology*. 2020;25(S3):24-34. [Russian: Суркова Е.А., Ковач А. Современные эхокардиографические подходы к комплексной оценке функции правого желудочка. Российский кардиологический журнал. 2020;25(S3):24-34]. DOI: 10.15829/1560-4071-2020-4067

27. Golukhova E.Z., Slivneva I.V., Mamalyga M.L., Marapov D.I., Alekhin M.N., Scopin I.I. et al. Right ventricular free-wall longitudinal speckle tracking strain as a prognostic criterion of adverse outcomes in patients with pulmonary hypertension: a systematic review and meta-analysis. *Russian Journal of Cardiology*. 2021;26(4):103–15. [Russian: Голухова Е.З., Сливнева И.В., Мамалыга М.Л., Марапов Д.И., Алехин М.Н., Скопин И.И. и др. Продольная деформация свободной стенки правого желудочка по данным спекл-трекинг эхокардиографии как прогностический критерий неблагоприятных исходов у пациентов с легочной гипертензией: систематический обзор и метаанализ. *Российский кардиологический журнал*. 2021;26(4):103–15]. DOI: 10.15829/1560-4071-2021-4417
28. Li Y, Wang T, Haines P, Li M, Wu W, Liu M et al. Prognostic Value of Right Ventricular Two-Dimensional and Three-Dimensional Speckle-Tracking Strain in Pulmonary Arterial Hypertension: Superiority of Longitudinal Strain over Circumferential and Radial Strain. *Journal of the American Society of Echocardiography*. 2020;33(8):985–994.e1. DOI: 10.1016/j.echo.2020.03.015
29. Wang TKM, Grimm RA, Rodriguez LL, Collier P, Griffin BP, Popović ZB. Defining the reference range for right ventricular systolic strain by echocardiography in healthy subjects: A meta-analysis. *PLOS ONE*. 2021;16(8):e0256547. DOI: 10.1371/journal.pone.0256547
30. Tadic M, Nita N, Schneider L, Kersten J, Buckert D, Gonska B et al. The Predictive Value of Right Ventricular Longitudinal Strain in Pulmonary Hypertension, Heart Failure, and Valvular Diseases. *Frontiers in Cardiovascular Medicine*. 2021;8:698158. DOI: 10.3389/fcvm.2021.698158
31. Shukla M, Park J-H, Thomas JD, Delgado V, Bax JJ, Kane GC et al. Prognostic Value of Right Ventricular Strain Using Speckle-Tracking Echocardiography in Pulmonary Hypertension: A Systematic Review and Meta-analysis. *Canadian Journal of Cardiology*. 2018;34(8):1069–78. DOI: 10.1016/j.cjca.2018.04.016
32. Richter MJ, Zedler D, Berliner D, Douschan P, Gall H, Ghofrani HA et al. Clinical Relevance of Right Atrial Functional Response to Treatment in Pulmonary Arterial Hypertension. *Frontiers in Cardiovascular Medicine*. 2021;8:775039. DOI: 10.3389/fcvm.2021.775039
33. Yogeswaran A, Rako ZA, Yildiz S, Ghofrani HA, Seeger W, Brito Da Rocha B et al. Echocardiographic evaluation of right ventricular diastolic function in pulmonary hypertension. *ERJ Open Research*. 2023;9(5):00226–2023. DOI: 10.1183/23120541.00226-2023
34. Davidson LJ, Tang GHL, Ho EC, Fudim M, Frisoli T, Camaj A et al. The Tricuspid Valve: A Review of Pathology, Imaging, and Current Treatment Options: A Scientific Statement From the American Heart Association. *Circulation*. 2024;149(22):e1223–38. DOI: 10.1161/CIR.0000000000001232
35. Chen L, Larsen CM, Le RJ, Connolly HM, Pislaru SV, Murphy JG et al. The prognostic significance of tricuspid valve regurgitation in pulmonary arterial hypertension. *The Clinical Respiratory Journal*. 2018;12(4):1572–80. DOI: 10.1111/crj.12713
36. Hahn RT, Badano LP, Bartko PE, Muraru D, Maisano F, Zamorano JL et al. Tricuspid regurgitation: recent advances in understanding pathophysiology, severity grading and outcome. *European Heart Journal - Cardiovascular Imaging*. 2022;23(7):913–29. DOI: 10.1093/ehjci/jeac009
37. Fernando H, Yanni M, Hariyanto D. Correlation of Echocardiography Pulmonary to Left Atrial Ratio (ePLAR) with Right Heart Catheterization Parameters in Pulmonary Arterial Hypertension. *European Heart Journal*. 2023;44(Suppl 1):ehac779.079. DOI: 10.1093/eurheartj/ehac779.079
38. Ahmad A, Zou Y, Zhang P, Li L, Wang X, Wang Y et al. Non-invasive imaging techniques for early diagnosis of bilateral cardiac dysfunction in pulmonary hypertension: current crests, future peaks. *Frontiers in Cardiovascular Medicine*. 2024;11:1393580. DOI: 10.3389/fcvm.2024.1393580
39. Querejeta Roca G, Campbell P, Claggett B, Vazir A, Quinn D, Solomon SD et al. Impact of lowering pulmonary vascular resistance on right and left ventricular deformation in pulmonary arterial hypertension. *European Journal of Heart Failure*. 2015;17(1):63–73. DOI: 10.1002/ehfj.177
40. El-Kersh K, Zhao C, Elliott G, Farber HW, Gomberg-Maitland M, Selej M et al. Derivation of a Risk Score (REVEAL-ECHO) Based on Echocardiographic Parameters of Patients With Pulmonary Arterial Hypertension. *Chest*. 2023;163(5):1232–44. DOI: 10.1016/j.chest.2022.12.045