



Прикроватная эхокардиография грудной клетки в отделении интенсивной терапии: новые данные об острой циркуляторной и дыхательной недостаточности.

Laurent Muller, Giovanni Volpicelli, Silvia Mongodi, Martin Girard, Thomas Fraccalini, Luna Gargani, Antoine Vieillard-Baron, Michel Slama, Derek Wu, Robert Arntfield, Paul Mayo, Laurent Zieleskiewicz

Резюме

В отделении интенсивной терапии циркуляторная и дыхательная недостаточность являются двумя основными типами полиорганной недостаточности и часто сопутствуют друг другу. При шоке и/или остром нарушении дыхания ультразвуковое исследование органов грудной клетки включает в себя одновременное проведение УЗИ легких и трансторакальной эхокардиографии. Несмотря на то, что тщательная клиническая оценка по-прежнему имеет первостепенное значение, современные данные показывают, что добавление ультразвукового исследования органов грудной клетки к стандартному обследованию повышает точность диагностики и позволяет быстро и адекватно принимать терапевтические решения при шоке и/или острой дыхательной недостаточности и при этом данное исследование является неинвазивным. Однако вопрос о его влиянии на выживаемость все еще остается открытым. В этом обзоре кратко изложены критерии, которые помогают определить пять основных гемодинамических профилей при шоке, а также конечные точки, позволяющие дифференцировать кардиогенный отек легких, острый респираторный дистресс-синдром, пневмонию, плевральный выпот и пневмоторакс. В нем также предложены практические алгоритмы лечения шока и/или дыхательной недостаточности в условиях стационара. Согласно имеющимся данным, в ближайшем будущем искусственный интеллект и автоматизированные измерения значительно повысят эффективность диагностики, воспроизводимость результатов, простоту использования и обучаемость при проведении ультразвукового исследования органов грудной клетки.

Торакальное ультразвуковое исследование сочетает в себе трансторакальную эхокардиографию (ТТЭ) и ультразвуковое исследование легких (УЗИЛ). В



отделении интенсивной терапии (ОИТ) оно повышает точность диагностики всех видов шока и острой одышки, особенно при дифференциации кардиогенных причин от респираторных заболеваний [1,2,3]. Ультразвуковое исследование органов грудной клетки является неинвазивным, широкодоступным методом, который позволяет сократить время постановки диагноза, начала лечения и пребывания в отделении интенсивной терапии [2, 4]. Согласно рекомендациям, ультразвуковое исследование органов грудной клетки следует проводить на ранних этапах для контроля гемодинамики, в том числе при инфузионной и вазопрессорной терапии [5,6,7]. Несмотря на то, что вопрос о влиянии этого метода на смертность остается дискуссионным, ультразвуковое исследование органов грудной клетки коррелирует с прогнозом у пациентов в отделении интенсивной терапии [2, 8]. В этом обзорном материале описаны основные критерии ультразвукового исследования органов грудной клетки для диагностики и лечения шока и одышки.

Основные эхокардиографические методы, сокращения и нормальные показатели подробно описаны в дополнительном материале S1. В этой статье рассматриваются наиболее распространенные ситуации. Предложенные алгоритмы не применимы при тяжелых врожденных заболеваниях, выраженной дисфункции клапанов, наличии протеза клапана, структурных заболеваниях сердца (тяжелая гипертрофическая обструктивная кардиомиопатия, рестриктивная кардиомиопатия, пациенты после трансплантации сердца, пациенты с вспомогательными устройствами для левого желудочка). Однако в таких случаях можно использовать ультразвуковое исследование легких. Важно также отметить, что большая часть опубликованных научных работ основана на наблюдательных или неслепых контролируемых исследованиях, которые, следовательно, имеют методологические ограничения.

Методология

Этот описательный обзор был подготовлен междисциплинарной группой международных экспертов, каждый из которых имеет множество публикаций в рецензируемых журналах (кварталы Q1/Q2) и представляет разные страны и географические регионы. Целью обзора было дать дидактический обзор ультразвукового исследования органов грудной клетки в условиях оказания



медицинской помощи (POCUS) в контексте острой сердечной и дыхательной недостаточности.

Стратегия поиска литературы

Был проведен систематический поиск в базах данных PubMed и Кокрейн с целью выявления соответствующих исследований, опубликованных в период с января 2000 по 2025 год. Поиск ограничивался полнотекстовыми статьями на английском языке. Для обеспечения максимальной чувствительности и специфичности были объединены следующие термины MeSH (PubMed) и ключевые слова из свободного текста:

- Основные термины: “ультразвук”, “диагностическая визуализация”, “УЗИ на месте оказания медицинской помощи”, “грудная клетка”, “грудная клетка”, “коллапс кровообращения”, “дыхательная недостаточность”, “неотложная медицинская помощь”, “неотложная медицинская помощь”, “реанимация”.

Термины, относящиеся к конкретной главе: например, “УЗИ легких” И “отек легких”, “сфокусированное УЗИ сердца” И “шок” и т.д.

Ультразвуковое исследование грудной клетки для выявления причины шока и определения тактики реанимации (рис. 1, табл. 1).

Take home message

Ультразвуковое исследование грудной клетки является наиболее часто выполняемым методом ультразвуковой диагностики у постели больного в отделениях интенсивной терапии. Недавние исследования показывают, что его использование может улучшить прогноз для пациентов. Цель данной статьи — обобщить последние достижения и будущие направления в этой области, уделяя особое внимание потенциальному вкладу искусственного интеллекта. В ней также представлены практические алгоритмы для использования у постели больного в случаях острой дыхательной или циркуляторной недостаточности.

Профиль 1: тяжелая гиповолемия, оценка реакции на инфузционную терапию. Клиническая оценка сама по себе не позволяет достоверно предсказать реакцию на инфузционную терапию: только ~50% тестов на



инфузионную нагрузку оказываются эффективными [13]. Ультразвуковое исследование органов грудной клетки позволяет получить более точную оценку, выявляя как реакцию на инфузионную терапию, так и риск перегрузки жидкостью.

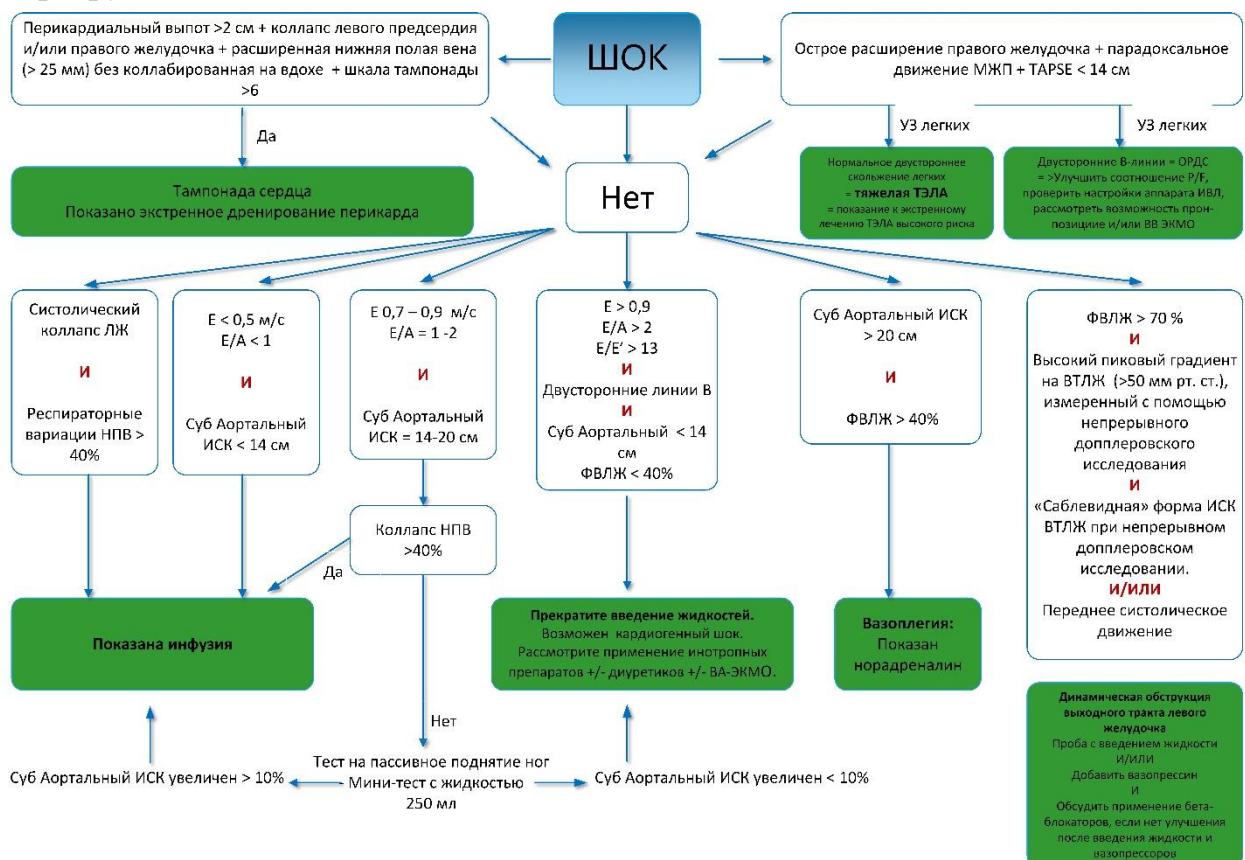


Рисунок 1. Ультразвуковое исследование грудной клетки для лечения шока. E = максимальная скорость митральной E -волн, зарегистрированная с помощью импульсно-волновой допплерографии. A = максимальная скорость митральной A -волн, зарегистрированная с помощью импульсно-волновой допплерографии, E' = максимальная скорость митральной E' -волн, зарегистрированная с помощью тканевой допплерографии в области митрального кольца, ИСК = интеграл скорости кровотока, ФВЛЖ = фракция выброса левого желудочка, НПВ = нижняя полая вена. Допплерография. RV = правый желудочек, RA = правое предсердие, ВТЛЖ = выходной тракт левого желудочка, $TAPSE$ = систолическая экскурсия плоскости трикуспидального кольца.

При тяжелой гиповолемии сочетание систолического коллапса левого желудочка (ЛЖ) («поцелуй ЛЖ») (Видео S1) и колебаний диаметра нижней полой вены (НПВ) более чем на 40 % в зависимости от дыхания (Видео S2) указывает на необходимость срочной инфузионной терапии или переливания крови [14].

Колебания давления в брюшной полости, связанные с дыханием, сами по себе не позволяют достоверно предсказать реакцию на инфузионную терапию как у пациентов, находящихся на искусственной вентиляции легких, так и у тех, кто дышит самостоятельно [15]. У пациентов,



находящихся на ИВЛ, чувствительность и специфичность метода составляют соответственно 0,67 и 0,68 (площадь под ROC-кривой = 0,79). У пациентов, дышащих самостоятельно, чувствительность и специфичность метода составляют соответственно 0,52 и 0,77 (площадь под ROC-кривой = 0,76) [15]. При спонтанной вентиляции высокое значение (> 40 %) индекса коллабируемости внутренней яремной вены (максимальный диаметр – минимальный диаметр / максимальный диаметр) указывает на чувствительность к инфузионной терапии.

Таблица 1. Критические значения ультразвукового исследования грудной клетки для лечения циркуляторного шока.

Клинический синдром	ЭХОКГ	УЗИ легких	Диагноз
Профиль 1: оценка реакции на инфузию			
Профиль 1a	Систолический коллапс левого желудочка и респираторные вариации нижней полой вены/верхней полой вены > 40%	Нормальный или ненормальный	Тяжелая гиповолемия. Показана инфузионная терапия.
Профиль 1b	$E < 0,7 \text{ м/с}$ и Субаортальный ИСК < 14 см		Вероятная гиповолемия, показана инфузионная терапия.
Профиль 1c	$0,1 < E < 1 \text{ м/с}$ и $0,5 < E/A < 2$ и $14 < \text{Субаортальный ИСК} < 20 \text{ см}$		Серая зона: оценка реакции на инфузионную терапию с помощью: инфузии 250 мл жидкости в течение 10 минут, теста с подъемом ног или мини-теста с введением жидкости.
Профиль 2a	$\text{ФВЛЖ} < 40\%$ и Субаортальный ИСК < 14 см and $E/E' > 14$	Нормальный	Левожелудочковый кардиогенный шок без отека легких. Показано применение инотропных препаратов.
Профиль 2B	$\text{ФВЛЖ} < 40\%$, субаортальный ИСК < 14 см и соотношение $/E' > 14$	Двусторонние В-линии. Отсутствие сохранных участков. Неправильная форма плевры.	Левожелудочковый кардиогенный шок с отеком легких. Показаны инотропные и диуретические препараты.
Профиль 3: острая правожелудочковая недостаточность			



Профиль 3а	Расширение правого желудочка и парадоксальная перегородка, а также $2,5 < \text{TR Vmax} < 3,5 \text{ м/с}$ и $\text{TAPSE} < 14 \text{ см}$ или снижение ФВ ПЖ ($< 40\%$)	Норма	При высоком риске легочной эмболии следует рассмотреть фибринолиз[9] или тромбэктомию с помощью катетера[10] или хирургическую тромбэктомию[9]. При отсутствии улучшения гемодинамики с помощью инотропных и вазопрессорных препаратов следует рассмотреть применение веноартериальной ЭКМО[11].
Профиль 3в	Расширение правого желудочка и парадоксальная перегородка, а также $2,5 < \text{TR Vmax} < 3,5 \text{ м/с}$ и $\text{TAPSE} < 14 \text{ см}$ или снижение ФВ ПЖ ($< 40\%$)	Двусторонние В-линии, неповрежденные участки, неровная плевра и/или уплотнения	ОРДС с выраженной гипоксической вазоконстрикцией легочных сосудов. Следует рассмотреть все способы увеличения соотношения Р/Ф: положение лежа на животе, ингаляционный оксид азота и/или веновенозная ЭКМО.
Профиль 4: тампонада сердца	Перикардиальный выпот $> 2 \text{ см}$ и коллапс правого желудочка и/или правого предсердия, а также расширение нижней полой вены $> 25 \text{ мм}$ без респираторных колебаний	Норма или патология	Показано экстренное дренирование перикарда. При сомнениях следует рассчитать балл тампонады[45] и выполнить экстренное дренирование перикарда, если балл > 6 .
Профиль 5: гиперкинезия левого желудочка с обструкцией ВТЛЖ	ФВ ЛЖ $> 70\%$ и высокий пиковый градиент через выходной тракт левого желудочка ($> 50 \text{ мм рт. ст.}$), измеренный при непрерывном допплеровском исследовании, и «саблевидный» ИСК ВТЛЖ при непрерывном допплеровском исследовании	Норма или патология	При отсутствии улучшения следует добавить норадреналин и инфузционную терапию. При отсутствии улучшения с помощью норадреналина, жидкостей и вазопрессина следует рассмотреть возможность добавления инфузии короткодействующего бета-блокатора.

Е = максимальная скорость митральной Е-волны, зарегистрированная с помощью импульсно-волновой допплерографии. А = максимальная скорость митральной А-волны, зарегистрированная с помощью импульсно-волновой допплерографии. Е' = максимальная скорость митральной Е'-волны, зарегистрированная с помощью тканевой допплерографии в области митрального кольца.. ФВЛЖ: фракция выброса левого желудочка. НПВ = нижняя полая вена. TR = триkuspidальная регургитация, зарегистрированная с помощью непрерывной



допплерографии. ПЖ: правый желудочек. ПА = правое предсердие. ВТЛЖ = выходной тракт левого желудочка. ТАРСЕ = систолическая экскурсия плоскости трикуспидального кольца.

Значение $< 40\%$ не исключает зависимости от преднагрузки [16, 17]. У пациентов, находящихся на искусственной вентиляции легких, колебания диаметра внутренней яремной вены зависят от дыхательного объема, который является основным фактором, определяющим взаимодействие сердечно-сосудистой и дыхательной систем [18]. При низком дыхательном объеме (< 6 мл/кг) площадь под ROC-кривой для прогнозирования реакции на инфузию жидкости невелика (0,70) [18]. У пациентов с дыхательным объемом > 8 мл/кг площадь под ROC-кривой составляет 0,88 (чувствительность 0,80, специфичность 0,94) [18]. Кратковременное увеличение дыхательного объема с 6 до 8 мл/кг может помочь выявить пациентов, реагирующих на инфузию жидкости.

При отсутствии этих признаков интеграл скорости кровотока (VTI - velocity time integral – ИСК – интеграл скорости кровотока) в суб-аортальной области < 16 см, связанный со скоростью митральной Е-волны $< 0,7$ м/с (что указывает как на низкий ударный объем, так и на низкое давление наполнения левого желудочка) (рис. S1, табл. S1 и S2), может помочь спрогнозировать реакцию на инфузию жидкости [19].

Некоторые ультразвуковые критерии могут служить основанием для прекращения введения жидкости.

1. Субаортальный ИСК < 14 см в сочетании с фракцией выброса левого желудочка (ФВЛЖ) $< 40\%$ (или суррогат в виде низкой скорости волны S' (< 6 см / с) или низкой систолической экскурсии в плоскости митрального кольца (MAPSE -mitral annulus plane systolic excursion)) (рис. S2) < 7 мм указывает на тяжелую недостаточность левого желудочка и высокий риск отека легких, особенно если при УЗИ легких выявляются двусторонние В-линии [19] (рис. S3, видео S3).

2. Два или более из следующих признаков указывают на высокое давление наполнения левого желудочка: расширенное левое предсердие (> 32 мл / m^2), соотношение E / E' > 14 , скорость трехстворчатой регургитации $> 2,8$ м / с, время замедления зубца E < 140 мс при синусовом ритме; соотношение E / E' > 11 , трехстворчатая регургитация $> 2,8$ м / с; время замедления зубца E



<160 мс, средняя скорость зубца Е> 1 м / с при фибрилляции предсердий [20,21,22].

Самый надежный способ оценить реакцию организма на нагрузку — измерить изменения в субаортальном ИСК.

Стандартный тест с введением жидкости: 4 мл/кг в течение < 15 мин; увеличение ИСК на $\geq 10\text{--}15\%$ свидетельствует о реакции на введение жидкости [23].

Мини-тест на инфузию жидкости: 100 мл за 1 минуту; увеличение ИСК на $\geq 10\%$ является прогностическим фактором, особенно у пациентов с риском перегрузки жидкостью (например, при ОРДС, септическом шоке) [24].

Пассивное поднятие ног (ППН): данный тест имитирует введение боляса жидкости в объеме 300 мл путем поднятия ног на 45° из положения полулежа. Увеличение ИСК на $\geq 10\text{--}15\%$ в течение 1 минуты подтверждает реакцию на лечение. Этот маневр применим как к пациентам, подключенным к аппарату ИВЛ, так и к тем, кто дышит самостоятельно, в том числе во время беременности [25, 26].

У стабильных пациентов, даже у тех, кто реагирует на лечение, следует избегать введения жидкости, чтобы не допустить ее избытка, который негативно влияет на прогноз.

Профиль 2: кардиогенный шок с поражением левого желудочка. Кардиогенный шок левого желудочка — это угрожающее жизни состояние, вызванное нарушением функции левого желудочка, приводящее к снижению сердечного выброса и гипоперфузии органов [27, 28]. Низкая фракция выброса левого желудочка классически измеряется методом Симпсона, но в отделениях интенсивной терапии часто используются такие показатели, как скорость S' или MAPSE, поскольку их проще и быстрее регистрировать (рис. S1). Низкий сердечный выброс оценивается путем регистрации субаортального VTI, который напрямую отражает ударный объем (рис. S1).

Кардиогенный шок имеет высокую смертность (30–40% в краткосрочной перспективе, $> 50\%$ через 1 год) [28]. Эхокардиография у постели больного имеет решающее значение для ранней диагностики и лечения. Она



позволяет врачам-реаниматологам быстро выявлять тяжелую дисфункцию левого желудочка и возможные основные причины, такие как заболевания клапанов, нарушения подвижности стенок или кардиомиопатии. При подозрении на левосторонний кардиогенный шок следует выполнить полную расширенную трансторакальную эхокардиографию (ТТЭ) или чреспищеводную эхокардиографию (ТЭЭ) [29]. Допплеровские измерения помогают оценить ударный объем, сердечный выброс и давление в левом предсердии [30]. Хотя это было подтверждено только при септическом шоке, низкая доставка кислорода ($DO_2 < 4$ мл/кг/мин) может указывать на тяжелый левожелудочковый кардиогенный шок, требующий незамедлительного терапевтического вмешательства. Эхокардиография определяет необходимость начала инотропной терапии, контролирует ответ с помощью измерений ИСК и помогает определить показания к механической поддержке кровообращения или катетеризации сердца.

Профиль 3: острая правожелудочковая (ПЖ) недостаточность и тяжелая тромбоэмболия легочной артерии. Трансторакальная эхокардиография особенно полезна для оценки функции правого желудочка, даже на базовом уровне [31, 32]. Однако правожелудочковую недостаточность по-прежнему сложно диагностировать прикроватными методами исследования [33]. Действительно, правожелудочковая недостаточность может развиться даже при дилатации правого желудочка и нормальном центральном венозном давлении [34]. Существуют два основных подхода: (1) выявление систолической дисфункции ПЖ с использованием ТАПСЕ, пиковой систолической скорости триkuspidального кольца по тканевой допплерографии или по фракционному изменению площади ПЖ [35] (рис. S2); (2) определение недостаточности ПЖ по расширению ПЖ (рис. S4) плюс повышенное ЦВД (> 8 мм рт. ст.), что указывает на системный застой [36, 37].

При ОРДС и тромбоэмболии легочной артерии (ТЭЛА) дисфункция ПЖ может проявляться в виде острого легочного сердца, характеризующегося расширением ПЖ ($\text{ПЖ/ЛЖ} > 0,6$ или $> 0,8$ в соответствии с исследованиями) и парадоксальным движением перегородки (рис. S4, видео S4/ S5) из-за высокой постнагрузки на ПЖ [38]. Увеличение



постнагрузки может быть вызвано обструкцией либо проксимальных (ТЭЛА), либо дистальных легочных капилляров (ОРДС). *Легочная гипертензия* наблюдается у 22 % пациентов с ОРДС средней и тяжелой степени и ухудшает прогноз [39]. Выводы: (1) при *легочном сердце* с повышенным ЦВД следует избегать употребления жидкости даже при шоке [37, 40]; (2) высокое давление драйва (≥ 18 см / H₂O), гиперкарбия (PaCO₂ ≥ 48 мм рт. ст.) и тяжелая гипоксемия (PaO₂ / FiO₂ < 150) повышают риск *легочного сердца* и должны быть скорректированы [39]; (3) пронозиция улучшает как механику легких, так и функцию ПЖ; (4) тяжелая дилатация ПЖ, связанная с высоким приводящим давлением, может определять выбор вено-венозной экстракорпоральной мембранный оксигенации (ВВ ЭКМО), обеспечивающей очень низкий дыхательный объем и последующее резкое давления драйва [41]. Будущие исследования помогут перейти к более точному и индивидуальному распределению этого ресурса. У пациентов в критическом состоянии сочетание ТТЭХОКГ, УЗИ легких и ультразвукового исследования вен помогает подтвердить (правожелудочковую недостаточность и венозный тромбоз) или исключить (отсутствие правожелудочковой недостаточности, отсутствие венозного тромбоза, альтернативный диагноз) диагноз тромбоэмболии легочной артерии (показатель площади под кривой 0,89), а также классифицировать риск [9, 42, 43]. Подвижный тромб в правом предсердии также подтверждает наличие тромбоэмболии легочной артерии без необходимости проведения компьютерной томографии. При других клинических сценариях или при отсутствии одного из этих признаков необходимо провести компьютерную томографию. При тромбоэмболии легочной артерии высокого риска с шоком и дисфункцией правого желудочка рекомендуется срочная реперфузия. Перегрузка жидкостью может усугубить недостаточность правого желудочка, особенно при его сильном расширении [12].

Профиль 4: тампонада сердца. Тампонада сердца - это клинический синдром, обычно ассоциирующий шок с повышением давления в яремной вене и приглушением сердечных тонов (триада Бека). Парадоксальный пульс > 10 мм рт.ст. также специфичен. Однако чувствительность



клинического диагноза остается низкой [44]. Использование шкалы тампонады сердца улучшает диагностические показатели и помогает определить необходимость дренирования перикарда. [45].

Эта шкала [45] основана на анамнестических критериях (злокачественное заболевание, туберкулез, недавняя лучевая терапия, недавняя вирусная инфекция, рецидивирующий перикардиальный выпот, терминальная почечная недостаточность, иммунодепрессия, аутоиммунные заболевания или заболевания щитовидной железы), клинических критериях (артериальная гипотензия, парадоксальный пульс > 10 мм рт. ст., одышка, ортопноэ, боль в груди, шум трения перикарда при аусcultации) и критериях визуализации (кардиомегалия на рентгенограмме грудной клетки, электроальтернация, микровольтаж на ЭКГ и признаки эхокардиографии). Общий балл по шкале тампонады > 6 указывает на необходимость срочного дренирования перикарда [45].

Эхокардиографические критерии тампонады сердца:

- Периферический перикардиальный выпот > 2 см (оценка = 3).
- Систолический коллапс правого предсердия $> 1/3$ сердечного цикла (оценка = 1).
- Диаметр МПК > 25 мм с менее чем 50% дыхательных изменений (оценка = 1,5).
- Диастолический коллапс правого желудочка (оценка = 1,5).
- Коллапс левого предсердия (оценка = 2).
- Митрально-трикуспидальный дыхательный поток (оценка = 1).
- «Качающееся» сердце (оценка = 1).

В недавнем ретроспективном исследовании, в котором приняли участие 239 пациентов, перенесших перикардиальный дренаж в течение 48 часов после поступления, были выявлены следующие эхокардиографические признаки: диастолический коллапс правого желудочка в 69,1 % случаев, дыхательная вариабельность скорости притока через митральный клапан в 62,3 % случаев, полнокровие нижней полой вены в 56,4 % случаев и систолический коллапс правого предсердия в 53,4 % случаев [46].

Недавно была предложена упрощенная оценка для прогнозирования необходимости дренирования перикарда на основе четырех переменных:



систолическое артериальное давление <100 мм рт.ст. (1,5 балла), диаметр выпота (1-2 см = 0 баллов, 2-3 см = 1,5 балла, > 3 см = 2 балла), диастолический коллапс правого желудочка (2 балла), изменение скорости митрального притока при дыхании $> 25\%$ (1 балл). Необходимость в перикардиальном дренировании в течение 24 часов составила 8,1 % при оценке < 2 баллов, 63,8 % при оценке 2–4 балла и 93,7 % при оценке > 4 баллов. Площадь под кривой для этой оценки составила $> 0,90$ [47].

Профиль 5: гиперкинез левого желудочка с обструкцией у пациентов в отделении интенсивной терапии. Гиперкинез левого желудочка с динамической обструкцией — относительно часто встречающееся и часто недооцениваемое гемодинамическое состояние в отделении интенсивной терапии, особенно при раннем септическом шоке. Оно наблюдается у 22 % пациентов [5, 48]. Это состояние связано с повышенной смертностью, особенно если фракция выброса (ФВ) превышает 70 % [49, 50]. Обструкция может возникать на разных уровнях левого желудочка (в верхушке, средней части желудочка или в выносящем тракте левого желудочка) и обычно является следствием сочетания анатомических предрасположенностей, таких как гипертрофия левого желудочка, гипертрофическая кардиомиопатия, синдром «разбитого сердца» или неправильное положение протеза клапана, и провоцирующих факторов, таких как гиповолемия, вазоплегия, применение инотропных и сосудорасширяющих препаратов (например, добутамина, нитратов) [48, 51, 52, 53].

Результаты катетеризации легочной артерии могут вводить в заблуждение, имитируя кардиогенный шок с низким сердечным выбросом и повышенным давлением наполнения. Напротив, эхокардиография остается наиболее надежным инструментом диагностики у постели больного. Ключевые эхокардиографические данные включают: гипердинамическую функцию ЛЖ (ФВЛЖ $> 70\%$, систолический коллапс левого желудочка); систолическое движение митрального клапана вперед (смещение дистальной части передней створки митрального клапана в сторону обструкции выводного тракта левого желудочка) (рис. S5a и 5b, видео S6); субаортальный стеноз, не поддающийся регистрации с помощью импульсно-волновой допплерографии, и «кинжалный» (или «сабельный»)



поток при непрерывно-волновой допплерографии в выносящем тракте левого желудочка (рис. S6); митральная регургитация (рис. S6); преждевременное закрытие аортального клапана. Цветная и импульсно-волновая допплерография помогают локализовать обструкцию в полости левого желудочка, а непрерывно-волновая допплерография подтверждает градиент давления в области обструкции [48].

Лечение направлено на устранение основной патофизиологической причины: восполнение объема циркулирующей крови при гиповолемии; применение вазопрессоров (например, вазопрессина) для восстановления постнагрузки при низком периферическом сосудистом сопротивлении; осторожное применение бета-адреноблокаторов короткого действия после восстановления объема циркулирующей крови и тонуса сосудов. Раннее выявление с помощью трансторакальной эхокардиографии и целенаправленное лечение нарушений гемодинамики с использованием вышеперечисленных методов могут восстановить гемодинамику и улучшить прогноз [48, 54, 55, 56].

УЗИ органов грудной клетки при острой дыхательной недостаточности (рис. 2).

В норме при ультразвуковом исследовании легких наблюдается скольжение легких (горизонтальная гиперэхогенная линия с боковыми движениями, синхронизированными с вентиляцией), сопровождающееся артефактами в виде А-линий (повторяющиеся горизонтальные линейные гиперэхогенные линии) (рис. S7) (видео S7, линейный датчик. Видео S8, конвексный датчик). При ультразвуковом исследовании легких необходимо изучить шесть областей интереса с каждой стороны (рис. S8). 12 областей интереса необходимы для того, чтобы не пропустить очаговые аномалии, и позволяют оценить состояние легких.

Как диагностировать кардиогенный отек легких. У пациентов с острой дыхательной недостаточностью с помощью низкочастотной сонографии можно точно подтвердить или исключить кардиогенный отек легких и оценить его тяжесть [57]. Характерным признаком при низкочастотной сонографии является диффузный интерстициальный паттерн,



характеризующийся множественными двусторонними В-линиями [58]. Если отек легких вызван левожелудочковой сердечной недостаточностью, этот паттерн должен коррелировать с повышенным давлением наполнения, выявлением при трансторакальной эхокардиографии. Если диффузные двусторонние В-линии отсутствуют, особенно при тяжелой дыхательной недостаточности, можно исключить кардиогенный отек легких с почти 100-процентной чувствительностью и прогностической ценностью отрицательного результата. В тяжелых случаях В-линии обычно появляются в передневерхних отделах. При более легких или хронических случаях В-линии могут быть видны только в боковых или заднебоковых отделах [59]. В обоих случаях распределение линий обычно однородное и соответствует силе тяжести — от зависимых отделов к независимым [60].

Типичное распределение линий Керли помогает отличить кардиогенные причины от некардиогенных (например, острый респираторный дистресс-синдром, фиброз легких), особенно в сочетании с другими признаками легочной гипертензии, такими как ровная плевральная линия и отсутствие субплевральных уплотнений [60]. Плеврит, если он имеется, обычно анэхогенный и может вызывать компрессионный ателектаз. Сложный или эхогенный выпот указывает на альтернативные или сопутствующие заболевания.

Рекомендуется комбинированное ультразвуковое исследование легких и сердца: УЗИЛ определяет степень легочного застоя, в то время как ТТЭХОКГ помогает выявить основную сердечную причину (рис. 2).

Ультразвуковое исследование легких для диагностики пневмонии. Ультразвуковое исследование легких, внедренное в клиническую практику, повышает точность и скорость диагностики пневмонии у пациентов с острой дыхательной недостаточностью [60]. При внебольничной бактериальной пневмонии ультразвуковое исследование легких обычно выявляет очаговые линии Керли, неровную плевру и субплевральные уплотнения в одном или двух сегментах. По мере прогрессирования заболевания в легких появляются гепатоподобные образования (уплотнения), часто с динамическими воздушными бронхограммами и



односторонним плевральным выпотом. Эти признаки являются высокочувствительными и специфичными для крупозной пневмонии [60, 61].

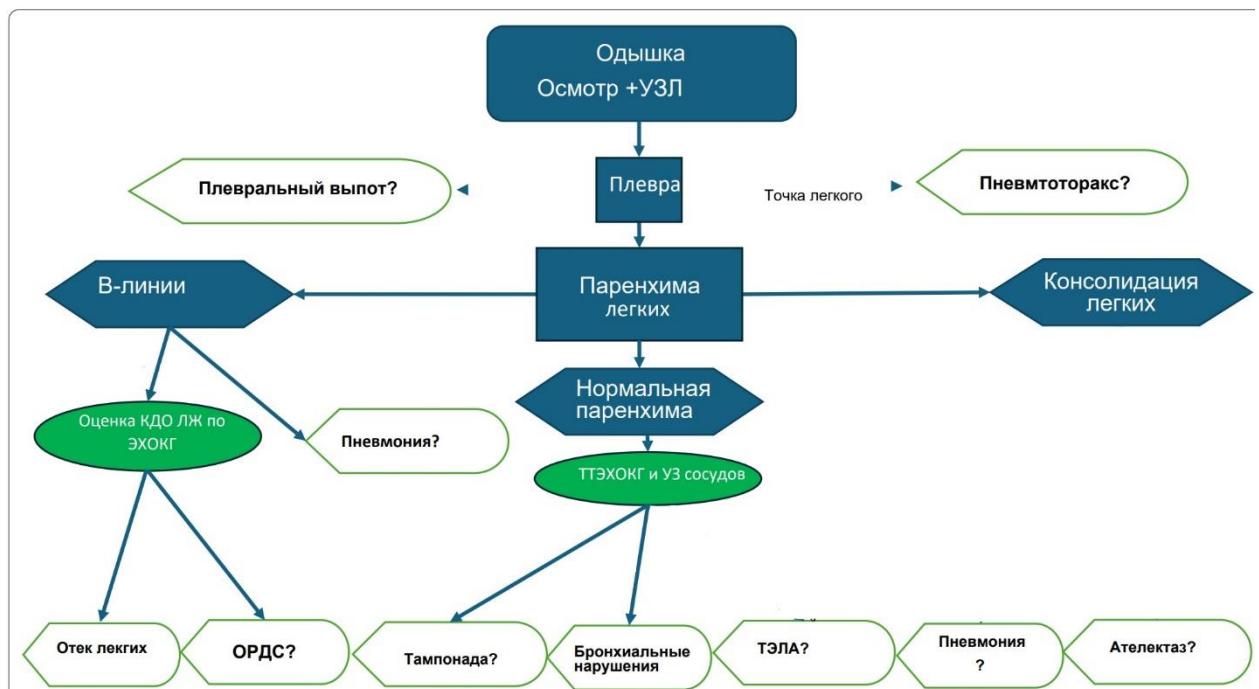


Рисунок 2. Ультразвуковая диагностика этиологии острой дыхательной недостаточности. УЗЛ — ультразвуковое исследование легких, ТТЭХОКГ — трансторакальная эхокардиография, УЗ — ультразвуковое исследование, ОРДС — острый респираторный дистресс-синдром, ЛЖ — левый желудочек, РЖ — правый желудочек

Вирусная пневмония и острый респираторный дистресс-синдром, напротив, проявляются двусторонними В-линиями, неровностями плевры, субплевральными консолидациями, неоднородным распределением, «чистыми» участками и распространением на задние отделы легких, в отличие от кардиогенного отека легких, при котором В-линии более однородны, плевра ровная, а двусторонние выпоты встречаются часто [62, 63]. Несмотря на то, что этиологическая диагностика острого респираторного дистресс-синдрома (ОРДС) с помощью обычного ультразвукового исследования остается крайне сложной задачей, анализ характеристик плевры с помощью искусственного интеллекта показал многообещающие результаты и может стать перспективным методом диагностики в будущем.

С помощью УЗИЛ можно ежедневно отслеживать аэрацию легких, оценивая ее по шкале аэрации, что помогает оценить эффективность лечения по снижению показателей [7, 64].



При ИВЛ-ассоциированной пневмонии (ВАП) интерпретация УЗИЛ более сложна из-за таких факторов, как ателектаз, перенесенные инфекции или ОРДС. Задние уплотнения часто встречаются у пациентов с искусственной вентиляцией легких, что делает их чувствительными, но неспецифичными для ВАП [65]. Внезапное увеличение показателя аэрации может свидетельствовать о суперинфекции [7, 66, 67]. Субплевральные консолидации в двух или более областях могут свидетельствовать в пользу диагноза внебольничной пневмонии, но при интерстициальной пневмонии или ОРДС они менее надежны [65, 67]. Повышенная васкуляризация доли легкого указывает на отсутствие гипоксической вазоконстрикции и с высокой вероятностью свидетельствует в пользу внебольничной пневмонии [68]. Наиболее специфичным признаком внебольничной пневмонии при УЗИЛ является динамическая линейная/арборесцентная бронхограмма в области консолидации [65, 67]. Если воздушная бронхограмма статична или отсутствует, нельзя исключать ателектаз. Бронхоскопия и последующая модификация ультразвукового изображения могут помочь прояснить этиологию ткане-подобного паттерна [69]. Сочетание ультразвукового исследования с клиническими шкалами в системах оценки улучшает процесс принятия решений [65, 68]. Ультразвуковая визуализация также помогает отслеживать реакцию на лечение внебольничной пневмонии и определять сроки прекращения приема антибиотиков [70].

Острый респираторный дистресс-синдром: диагностика и оценка морфологической распространенности поражения легких. Современная лучевая диагностика заболеваний легких основана на трех основных паттернах: линии А (или отсутствие линий В), интерстициальный паттерн (множественные двусторонние передние линии В) и паттерн консолидации. Они указывают на различную степень потери альвеолярной аэрации, но сами по себе не являются специфичными для какого-либо заболевания, поскольку и линии В, и консолидация встречаются при многих патологиях легких [71].

При ОРДС УЗИ обычно показывает неоднородные двусторонние находки — смесь В-линий и уплотнений с сохранными участками — и часто является более чувствительным, чем рентгенография грудной



клетки. Недавно УЗИЛ стало валидным диагностическим критерием визуализации грудной клетки при ОРДС [72], особенно когда опытным оператором выявляются двусторонние легочные аномалии. Таким образом, УЗИЛ в конечном итоге может использоваться вместо рентгенограмм для диагностики ОРДС в сочетании с анамнестическими данными, сроками, критериями оксигенации и вентиляции легких.

УЗИЛ также является эффективным инструментом мониторинга при острой дыхательной недостаточности. С помощью 12-зонного сканирования можно количественно оценить потерю аэрации, присвоив каждой зоне оценку от 0 до 3 баллов в зависимости от наличия линий А, разделенных линий В, сливающихся линий В и консолидации. Недавно группа экспертов пришла к единому мнению, что оценку аэрации можно усовершенствовать, включив в нее процент площади сканирования, занятой линиями В [7]. Показатель аэрации по шкале УЗИЛ коррелирует с плотностью тканей, определяемой с помощью компьютерной томографии, и обратно пропорционален растяжимости легких [73]. Таким образом, он может помочь в выборе режима ПДКВ, оценке реакции на терапию и принятии решений, например о положении пациента лежа на животе [74]. Оценка по шкале передней зоны помогает отличить очаговый от нефокального ОРДС, что влияет на стратегию лечения и особенно на решение о рекрутирующих маневрах [75]. Однако при мониторинге состояния пациента с использованием этих показателей важно учитывать режим искусственной вентиляции легких, в том числе неинвазивной, поскольку он напрямую влияет на объем легких и, следовательно, на их плотность. У пациентов, находящихся на искусственной вентиляции легких, гипоксическая вазоконстрикция и высокое давление в конце выдоха могут увеличить постнагрузку на правый желудочек и впоследствии вызвать острую правожелудочковую недостаточность (острый легочный сердце). Эхокардиография помогает на ранней стадии выявить острое легочное сердце, особенно при высоком положительном давлении в конце выдоха ($> 10 \text{ см}/\text{H}_2\text{O}$) и/или низком соотношении $\text{PaO}_2/\text{FiO}_2 (< 150)$.

Показатель аэрации по шкале УЗИЛ также можно использовать для прогнозирования осложнений при отключении от аппарата искусственной



вентиляции легких [76]. В этом случае шкала УЗИЛ еще более эффективна в сочетании с ультразвуковым исследованием сердца и диафрагмы [76].

Как диагностировать пневмоторакс и определить его объем. Пневмоторакс (ПТ) — потенциально опасное для жизни состояние, требующее быстрой диагностики и лечения. В травматологии рентгенографию грудной клетки проводят в положении лежа на спине в переднезадней проекции (а не в прямой переднезадней проекции), что снижает точность диагностики. Таким образом, рентгенография грудной клетки может привести к задержке в постановке диагноза и не выявить до 70 % случаев травматического пневмоторакса, в том числе 5–7 % случаев обширного пневмоторакса, требующих дренирования грудной клетки. Поэтому в таких случаях предпочтительным методом диагностики первой линии является ультразвуковая сонография [77].

При пневмотораксе воздух в плевральной полости препятствует визуализации легких. Таким образом, выявление смещения легких, легочного пульса, линий Керли или консолидации исключает пневмоторакс с высокой отрицательной прогностической ценностью [78]. Единственным патогномоничным признаком является «точка легкого», но при полном пневмотораксе она может быть не видна [79]. Исследования и метаанализы подтверждают, что УЗИЛ более чувствительно и так же специфично, как рентгенография грудной клетки, при диагностике пневмоторакса [80].

Ультразвуковая диагностика эффективна в постпроцедурном и периоперационном периодах (после бронхоскопии или установки центрального венозного катетера) и позволяет лучше оценить уменьшение плеврального выпота после дренирования, чем рентгенография грудной клетки [81,82,83]. Хотя ультразвуковое исследование не является стандартным методом дренирования плеврального выпота, небольшие исследования показывают, что оно может быть полезно для определения места установки дренажа, выявления экскурсий диафрагмы и межреберных артерий, а также для определения окончательного положения дренажа. С помощью ультразвукового исследования легких можно приблизительно определить размер пневмоторакса: большой (точка в легком расположена



кзади от срединной подмышечной линии) или малый (точка в легком расположена кпереди от срединной подмышечной линии) [84].

Обучение ограничено редкостью случаев пневмоторакса.

Как диагностировать и количественно оценить плевральный выпот. Плевральный выпот — очень распространенное состояние у пациентов в отделениях интенсивной терапии, оно встречается у 83 % пациентов с острым респираторным дистресс-синдромом [85]. Ультразвуковая сонография — ключевой метод выявления, определения характеристик и лечения плеврального выпота, обеспечивающий более высокую точность диагностики по сравнению с рентгенографией грудной клетки, особенно по сравнению с компьютерной томографией [86]. Трёхчасовой программы обучения с практическими занятиями обычно достаточно, чтобы научиться выявлять и оценивать выпоты [87].

При первом диагностическом подходе УЗИЛ следует выполнять с использованием низкочастотного конвексного или фазированного датчика, фокусируясь сначала на зависимых (заднебоковых) областях грудной клетки и направляя датчик на головную часть [88]. У пациентов в критическом состоянии важно различать простой и сложный выпот. Простой выпот проявляется в виде темной (безэховой) жидкости и может быть транссудативным или экссудативным [89] (Видео S10). При сложных выпотах наблюдаются внутренние эхосигналы, перегородки или локусы, указывающие на экссудаты или злокачественные образования (видео S11).

Существует множество формул для оценки объема выпота, но большинство из них плохо коррелируют с фактическим объемом удаленной жидкости [84]. Формула Балика (объем = максимальное расстояние между париетальной и висцеральной плеврой (мм) × 20) позволяет легко определить объем плеврального выпота [90], и ее достоверность была подтверждена независимыми исследователями [91]. Мы предлагаем использовать формулу Ремерана и др. [92], хотя она и не прошла валидацию. У пациентов в отделении интенсивной терапии, лежащих на спине, объем выпота, рассчитанный с помощью компьютерной томографии ($r = 0,903$), и объем удаленного выпота ($r = 0,839$) хорошо коррелировали с



произведением максимального краинокудального расстояния на боковой стенке грудной клетки (в см) на площадь паравертебрального выпота (в см^2).

При плевральном выпоте у пациентов в критическом состоянии следует рассмотреть возможность проведения торакоцентеза с учетом индивидуальных рисков и пользы [86]. Дренаж способствует улучшению соотношения $\text{PaO}_2/\text{FiO}_2$ и увеличению количества дней без искусственной вентиляции легких. Факторами, способствующими улучшению состояния после дренирования, являются большой объем выпота, плохая переносимость дыхательной недостаточности, быстрое появление выпота и раннее дренирование. Торакоцентез под ультразвуковым контролем безопасен даже для пациентов, подключенных к аппарату искусственной вентиляции легких, и частота осложнений составляет менее 2 % [87, 88]. УЗИ помогает найти наиболее безопасное место для прокола и снижает риск пневмоторакса или повреждения сосудов. Кроме того, оно позволяет ускорить подтверждение расправления легкого и безопасное удаление плевральной дренажной трубки [89, 90].

Перспективные направления: технические инновации, автоматизированные измерения и искусственный интеллект

Искусственный интеллект (ИИ) и новые технологии коренным образом меняют ультразвуковую диагностику органов грудной клетки в отделениях интенсивной терапии. В настоящее время ИИ выполняет две ключевые функции: автоматизирует такие задачи, как получение и классификация изображений, а также помогает в постановке диагноза, выявляя клинически значимые закономерности. В ультразвуковой диагностике сердца ИИ поддерживает такие задачи, как сегментация изображений, и может улучшить точность измерений, в том числе фракции выброса левого желудочка, коллаборации нижней полой вены и субаортального интеграла скорости кровотока [93, 94]. Несмотря на то, что для отслеживания субаортального внутрисосудистого контрастирования требуется высокое качество изображения и некоторые ограничения,



искусственный интеллект может обеспечить точность на уровне эксперта при выполнении отдельных задач [95].

В УЗИЛ модели на основе искусственного интеллекта точно определяют различные заболевания легких [96]. Среди множества растущих областей применения ИИ продемонстрировал 92-процентную точность в выявлении плеврального выпота, высокую чувствительность при диагностике пневмоторакса за счет автоматического определения смещения легкого и возможность стандартизировать количественную оценку линии В, что помогает определить степень аэрации и застойных явлений [97,98,99,100]. Искусственный интеллект также демонстрирует высокую чувствительность при диагностике пневмоторакса за счет автоматического выявления смещения легкого или количественной оценки смещения легкого с помощью технологии спекл-трекинга [101, 102]. К недостаткам УЗИЛ можно отнести низкую воспроизводимость и сопоставимость результатов, поскольку в УЗИЛ используются различные шкалы, которые представляют собой числовые приближения, а не количественные показатели. Благодаря снижению вариативности в работе разных операторов искусственный интеллект может сделать интерпретацию более надежной и доступной, особенно для неспециалистов [103,104,105].

В сфере образования искусственный интеллект можно использовать в качестве цифрового наставника, который в режиме реального времени рассказывает новичкам об анатомии и патологиях, особенно когда нет возможности обратиться к экспертам [106].

Инновации в области машинного оборудования также могут способствовать этому сдвигу. Портативные устройства с искусственным интеллектом позволяют быстро проводить оценку состояния пациента у постели больного, что особенно полезно в условиях ограниченных ресурсов. Роботизированные ультразвуковые системы могут автономно сканировать грудную клетку, снижая нагрузку на персонал, что может быть особенно полезно во время пандемии, а также повышать стабильность и воспроизводимость результатов [107]. Также появляются носимые ультразвуковые устройства, позволяющие непрерывно и неинвазивно отслеживать состояние сердца и легких [108].



Заключение

В настоящее время ультразвуковое исследование органов грудной клетки является неотъемлемой частью клинического обследования пациентов в состоянии шока и/или с острой дыхательной недостаточностью. Оно позволяет быстро и точно поставить диагноз и принять терапевтические решения непосредственно у постели больного. Сочетание искусственного интеллекта с портативными и автоматизированными ультразвуковыми технологиями обещает сделать ультразвуковое исследование органов грудной клетки более быстрым, объективным и доступным в отделениях интенсивной терапии. Опрос, опубликованный в 2015 году, показал, что врачи отделений интенсивной терапии в основном проводят эхокардиографию и лишь изредка — ультразвуковое исследование легких [109]. Согласно современным литературным данным, в отделении интенсивной терапии каждая эхокардиография должна сопровождаться ультразвуковым исследованием легких, и наоборот. С образовательной точки зрения систематическое проведение ультразвукового исследования сердца и легких можно объединить под термином «торакальное ультразвуковое исследование».

Список литературы

1. Yoshida T, Yoshida T, Noma H, Nomura T, Suzuki A, Mihara T (2023) Diagnostic accuracy of point-of-care ultrasound for shock: a systematic review and meta-analysis. *Crit Care* 27:200
2. Szabo GV, Szigetvary C, Szabo L, Dembrovszky F, Rottler M, Ocskay K, Madzsar S, Hegyi P, Molnar Z (2023) Point-of-care ultrasound improves clinical outcomes in patients with acute onset dyspnea: a systematic review and meta-analysis. *Intern Emerg Med* 18:639–653
3. Bataille B, Riu B, Ferre F, Moussot PE, Mari A, Brunel E, Ruiz J, Mora M, Fourcade O, Genestal M, Silva S (2014) Integrated use of bedside lung ultrasound and echocardiography in acute respiratory failure: a prospective observational study in ICU. *Chest* 146:1586–1593
4. Teboul JL, Saugel B, Cecconi M, De Backer D, Hofer CK, Monnet X, Perel A, Pinsky MR, Reuter DA, Rhodes A, Squara P, Vincent JL, Scheeren TW (2016) Less invasive hemodynamic monitoring in critically ill patients. *Intensive Care Med* 42:1350–1359
5. Diaz-Gomez JL, Sharif S, Ablordeppey E, Lanspa MJ, Basmaji J, Carver T, Taylor JC, Gargani L, Goffi A, Hynes AM, Hernandez A, Kasal J, Koratala A, Kort S, Lindblom P, Liu R, Livezey P, Lobo V, Malone S, Mayo P, Mitchell C, Niu N, Panebianco N, Parekh M, Price S, Sarwal A, Teran F, Via G, Vieillard-Baron A, Weekes A, Wiley B, Lewis K, Nikravan S (2025) Society of Critical Care Medicine guidelines on adult critical care ultrasonography: focused update 2024. *Crit Care Med* 53:e447–e458
6. De Backer D, Cecconi M, Chew MS, Hajjar L, Monnet X, Ospina-Tascon GA, Ostermann M, Pinsky MR, Vincent JL (2022) A plea for personalization of the hemodynamic management of septic shock. *Crit Care* 26:372
7. Mongodi S, Cortegiani A, Alonso-Ojembarrena A, Biasucci DG, Bos LDJ, Bouhemad B, Cantinotti M, Ciucu I, Corradi F, Girard M, Gregorio-Hernandez R, Gualano MR, Mojoli F, Ntoumenopoulos G, Pisani L, Raimondi F, Rodriguez-Fanjul J, Savoia M, Smit MR, Tuinman PR, Zieleskiewicz L, De Luca D (2025) ESICM-ESPNIC international expert consensus on quantitative lung ultrasound in intensive care. *Intensive Care Med*



- 51(6):1022–1049. <https://doi.org/10.1007/s00134-025-07932-y>
8. Zieleskiewicz L, Lopez A, Hraiech S, Baumstarck K, Pastene B, Di Bisceglie M, Coiffard B, Duclos G, Boussuges A, Bobbia X, Einav S, Papazian L, Leone M (2021) Bedside POCUS during ward emergencies is associated with improved diagnosis and outcome: an observational, prospective, controlled study. *Crit Care* 25:34
9. Millington SJ, Aissaoui N, Bowcock E, Brodie D, Burns KEA, Doufle G, Haddad F, Lahm T, Piazza G, Sanchez O, Savale L, Vieillard-Baron A (2024) High and intermediate risk pulmonary embolism in the ICU. *Intensive Care Med* 50:195–208
10. Pruszczyk P, Klok FA, Kucher N, Roik M, Meneveau N, Sharp ASP, Nielsen-Kudsk JE, Obradovic S, Barco S, Giannini F, Stefanini G, Tarantini G, Konstantinides S, Dudek D (2022) Percutaneous treatment options for acute pulmonary embolism: a clinical consensus statement by the ESC Working Group on Pulmonary Circulation and Right Ventricular Function and the European Association of Percutaneous Cardiovascular Interventions. *EuroIntervention* 18:e623–e638
11. Abdulaziz SM, Kakar V, Kumar PG, Hassan IF, Combes A, Brodie D, Barrett NA, Tan J, Al Ali SF (2025) Mechanical circulatory support for massive pulmonary embolism. *J Am Heart Assoc* 14:e036101
12. MekontsoDessap A, AlShamsi F, Belletti A, De Backer D, Delaney A, Moller MH, Gendreau S, Hernandez G, Machado FR, Mer M, Monge Garcia MI, Myatra SN, Peng Z, Perner A, Pinsky MR, Sharif S, Teboul JL, Vieillard-Baron A, Alhazzani W, European Society of Intensive Care M (2025) European Society of Intensive Care Medicine (ESICM) 2025 clinical practice guideline on fluid therapy in adult critically ill patients: part 2—the volume of resuscitation fluids. *Intensive Care Med* 51:461–477
13. Roger C, Zieleskiewicz L, Demattei C, Lakhal K, Piton G, Louart B, Con-stantin JM, Chabanne R, Faure JS, Mahjoub Y, Desmeulles I, Quintard H, Lefrant JY, Muller L, AzuRea G (2019) Time course of fluid responsive- ness in sepsis: the fluid challenge revisiting (FCREV) study. *Crit Care* 23:179
14. Tung Chen Y, Blancas Gomez-Casero R, Quintana Diaz M, Oliva B (2019) Inspiratory collapse of the inferior vena cava and the kissing ventricle sign: markers of poor prognosis in emergency gastrointestinal bleed- ing. *Emergencias* 31:79–85
15. Long E, Oakley E, Duke T, Babl FE, Paediatric Research in Emergency Departments International C (2017) Does respiratory variation in inferior vena cava diameter predict fluid responsiveness: a systematic review and meta-analysis. *Shock* 47:550–559
16. Airapetian N, Maizel J, Alyamani O, Mahjoub Y, Lorne E, Levrard M, Ammenouche N, Seydi A, Tinturier F, Lobjoie E, Dupont H, Slama M (2015) Does inferior vena cava respiratory variability predict fluid responsiveness in spontaneously breathing patients? *Crit Care* 19:400
17. Muller L, Bobbia X, Toumi M, Louart G, Molinari N, Ragonnet B, Quintard H, Leone M, Zoric L, Lefrant JY, AzuRea G (2012) Respiratory variations of inferior vena cava diameter to predict fluid responsiveness in spontaneously breathing patients with acute circulatory failure: need for a cautious use. *Crit Care* 16:R188
18. Si X, Xu H, Liu Z, Wu J, Cao D, Chen J, Chen M, Liu Y, Guan X (2018) Does respiratory variation in inferior vena cava diameter predict fluid respon- siveness in mechanically ventilated patients? A systematic review and meta- analysis. *Anesth Analg* 127:1157–1164
19. Geri G, Vignon P, Aubry A, Fedou AL, Charron C, Silva S, Repesse X, Vieillard-Baron A (2019) Cardiovascular clusters in septic shock combining clinical and echocardiographic parameters: a post hoc analysis. *Intensive Care Med* 45:657–667
20. Robinson S, Ring L, Oxborough D, Harkness A, Bennett S, Rana B, Sutaria N, Lo Giudice F, Shun-Shin M, Paton M, Duncan R, Willis J, Colebourn C, Bassindale G, Gatenby K, Belham M, Cole G, Augustine D, Smiseth OA (2024) The assessment of left ventricular diastolic function: guidance and recommendations from the British Society of Echocardiography. *Echo Res Pract* 11:16
21. Vauthier C, Chabannon M, Markarian T, Taillandy Y, Guillemet K, Krebs H, Bazalgette F, Muller L, Claret PG, Bobbia X (2021) Point-of-care chest ultrasound to diagnose acute heart failure in emergency department patients with acute dyspnea: diagnostic performance of an ultrasound- based algorithm. *Emergencias* 33:441–446
22. Nagueh SF, Sanborn DY, Oh JK, Anderson B, Billick K, Derumeaux G, Klein A, Koulogiannis K, Mitchell C, Shah A, Sharma K, Smiseth OA, Tsang TSM (2025) Recommendations for the evaluation of left ventricu- lar diastolic function by echocardiography and for heart failure with preserved ejection fraction diagnosis: an update from the American Society of Echocardiography. *J Am Soc Echocardiogr* 38:537–569
23. Cecconi M, Hernandez G, Dunser M, Antonelli M, Baker T, Bakker J, Duranteau J, Einav S, Groeneveld ABJ, Harris T, Jog S, Machado FR, Mer M, Monge Garcia MI, Myatra SN, Perner A, Teboul JL, Vincent JL, De Backer D (2019) Fluid administration for acute circulatory dysfunction using basic monitoring: narrative review and expert panel recommen- dations from an ESICM task force. *Intensive Care Med* 45:21–32
24. Muller L, Toumi M, Bousquet PJ, Riu-Poulenc B, Louart G, Candela D, Zoric L, Suehs C, de La Coussaye JE, Molinari N, Lefrant JY, AzuRea G (2011) An increase in aortic blood flow after an infusion of 100 ml colloid over 1 minute can predict fluid responsiveness: the mini-fluid challenge study. *Anesthesiology* 115:541–547
25. Monnet X, Marik P, Teboul JL (2016) Passive leg raising for predicting fluid responsiveness: a systematic review and meta-analysis. *Intensive Care Med* 42:1935–1947



26. Brun C, Zieleskiewicz L, Textoris J, Muller L, Bellefleur JP, Antonini F, Tour- ret M, Ortega D, Vellin A, Lefrant JY, Boubli L, Bretelle F, Martin C, Leone M (2013) Prediction of fluid responsiveness in severe preeclamptic patients with oliguria. *Intensive Care Med* 39:593–600
27. Waksman R, Pahuja M, van Diepen S, Proudfoot AG, Morrow D, Spitzer E, Nichol G, Weisfeldt ML, Moscucci M, Lawler PR, Mebazaa A, Fan E, Dick- ert NW, Samsky M, Kormos R, Pina IL, Zuckerman B, Farb A, Sapirstein JS, Simonton C, West NEJ, Damluji AA, Gilchrist IC, Zeymer U, Thiele H, Cutlip DE, Krucoff M, Abraham WT (2023) Standardized definitions for cardiogenic shock research and mechanical circulatory support devices: scientific expert panel From the Shock Academic Research Consortium (SHARC). *Circulation* 148:1113–1126
28. Sinha SS, Morrow DA, Kapur NK, Kataria R, Roswell RO (2025) 2025 concise clinical guidance: an ACC expert consensus statement on the evaluation and management of cardiogenic shock: a report of the American College of Cardiology Solution Set Oversight Committee. *J Am Coll Cardiol* 85:1618–1641
29. Expert Round Table on Echocardiography in ICU (2014) International consensus statement on training standards for advanced critical care echocardiography. *Intensive Care Med* 40:654–666
30. Mercado P, Maizel J, Beyls C, Titeca-Beauport D, Joris M, Kontar L, Riviere A, Bonef O, Soupison T, Tribouilloy C, de Cagny B, Slama M (2017) Transthoracic echocardiography: an accurate and precise method for estimating cardiac output in the critically ill patient. *Crit Care* 21:136
31. Robba C, Wong A, Poole D, Al Tayar A, Arntfield RT, Chew MS, Corradi F, Doufle G, Goffi A, Lamperti M, Mayo P, Messina A, Mongodi S, Narasim- han M, Puppo C, Sarwal A, Slama M, Taccone FS, Vignon P, Vieillard- Baron A, European Society of Intensive Care Medicine Task Force for Critical Care (2021) Basic ultrasound head-to-toe skills for intensivists in the general and neuro intensive care unit population: consensus and expert recommendations of the European Society of Intensive Care Medicine. *Intensive Care Med* 47:1347–1367
32. Sanfilippo F, Huang S, Herpain A, Balik M, Chew MS, Clau-Terre F, Corre- dor C, De Backer D, Fletcher N, Geri G, Mekontso-Dessap A, McLean A, Morelli A, Orde S, Petrinic T, Slama M, van der Horst ICC, Vignon P, Mayo P, Vieillard-Baron A (2021) The PRICES statement: an ESICM expert consensus on methodology for conducting and reporting critical care echocardiography research studies. *Intensive Care Med* 47:1–13
33. Vieillard-Baron A, Pinsky MR (2021) The difficulty in defining right ven- tricular failure at the bedside and its clinical significance. *Ann Intensive Care* 11:122
34. Zhang H, Lian H, Zhang Q, Zhao H, Wang X (2024) Can central venous pressure help identify acute right ventricular dysfunction in mechani- cally ventilated critically ill patients? *Ann Intensive Care* 14:114
35. Lanspa MJ, Cirulis MM, Wiley BM, Olsen TD, Wilson EL, Beesley SJ, Brown SM, Hirshberg EL, Grissom CK (2021) Right ventricular dysfunction in early sepsis and septic shock. *Chest* 159:1055–1063
36. Harjola VP, Mebazaa A, Celutkiene J, Bettex D, Bueno H, Chioncel O, Crespo-Leiro MG, Falk V, Filippatos G, Gibbs S, Leite-Moreira A, Lassus J, Masip J, Mueller C, Mullens W, Naeije R, Nordegraaf AV, Parissis J, Riley JP, Ristic A, Rosano G, Rudiger A, Ruschitzka F, Seferovic P, Sztrymf B, Vieillard-Baron A, Yilmaz MB, Konstantinides S (2016) Contemporary management of acute right ventricular failure: a statement from the Heart Failure Association and the Working Group on Pulmonary Circulation and Right Ventricular Function of the European Society of Cardiology. *Eur J Heart Fail* 18:226–241
37. Vieillard-Baron A, Prigent A, Repesse X, Goudelin M, Prat G, Evrard B, Charron C, Vignon P, Geri G (2020) Right ventricular failure in septic shock: characterization, incidence and impact on fluid responsiveness. *Crit Care* 24:630
38. Vieillard-Baron A, Prin S, Chergui K, Dubourg O, Jardin F (2002) Echo- Doppler demonstration of acute cor pulmonale at the bedside in the medical intensive care unit. *Am J Respir Crit Care Med* 166:1310–1319
39. Mekontso Dessap A, Boissier F, Charron C, Begot E, Repesse X, Legras A, Brun-Buisson C, Vignon P, Vieillard-Baron A (2016) Acute cor pulmonale during protective ventilation for acute respiratory distress syndrome: prevalence, predictors, and clinical impact. *Intensive Care Med* 42:862–870
40. Joseph A, Evrard B, Petit M, Goudelin M, Prat G, Slama M, Charron C, Vignon P, Vieillard-Baron A (2024) Fluid responsiveness in acute respira- tory distress syndrome patients: a post hoc analysis of the HEMOPRED study. *Intensive Care Med* 50:1850–1860
41. Petit M, Mekontso-Dessap A, Masi P, Legras A, Vignon P, Vieillard-Baron A (2021) Evaluation of right ventricular function and driving pressure with blood gas analysis could better select patients eligible for VV ECMO in severe ARDS. *Crit Care* 25:220
42. Konstantinides SV, Meyer G, Becattini C, Bueno H, Geersing GJ, Harjola VP, Huisman MV, Humbert M, Jennings CS, Jimenez D, Kucher N, Lang IM, Lankeit M, Lorusso R, Mazzolai L, Meneveau N, Ainle FN, Prandoni P, Pruszczyk P, Righini M, Torbicki A, Van Belle E, Zamorano JL, The Task Force for the Management of Acute Pulmonary Embolism of the European Society of C (2019) 2019 ESC Guidelines for the diagnosis and management of acute pulmonary embolism developed in collaboration with the European Respiratory Society (ERS): The Task Force for the diagnosis and management of acute pulmonary embolism of the European Society of Cardiology (ESC). *Eur Respir J* 54



43. Melo RH, Gioli-Pereira L, Lourenco ID, Da Hora PR, Bernardo AT, Volpicelli G (2025) Diagnostic accuracy of multi-organ point-of-care ultrasound for pulmonary embolism in critically ill patients: a systematic review and meta-analysis. *Crit Care* 29:162
44. Roy CL, Minor MA, Brookhart MA, Choudhry NK (2007) Does this patient with a pericardial effusion have cardiac tamponade? *JAMA* 297:1810–1818
45. Ristic AD, Imazio M, Adler Y, Anastakis A, Badano LP, Brucato A, Caforio AL, Dubourg O, Elliott P, Gimeno J, Helio T, Klingel K, Linhart A, Maisch B, Mayosi B, Mogensen J, Pinto Y, Seggewiss H, Seferovic PM, Tavazzi L, Tomkowski W, Charron P (2014) Triage strategy for urgent management of cardiac tamponade: a position statement of the European Society of Cardiology Working Group on Myocardial and Pericardial Diseases. *Eur Heart J* 35:2279–2284
46. Eke OF, Jalbout NA, Selame L, Gullikson J, Deng H, Shokoohi H (2024) Pericardial tamponade: a new perspective on echocardiographic features and application of a prediction score. *Intern Emerg Med* 19:1757–1764
47. Duanmu Y, Choi DS, Tracy S, Harris OM, Schleifer JI, Dadabhoy FZ, Wu JC, Platz E (2021) Development and validation of a novel prediction score for cardiac tamponade in emergency department patients with pericardial effusion. *Eur Heart J Acute Cardiovasc Care* 10:542–549
48. Slama M, Tribouilloy C, Maizel J (2016) Left ventricular outflow tract obstruction in ICU patients. *Curr Opin Crit Care* 22:260–266
49. Chauvet JL, El-Dash S, Delastre O, Bouffandeau B, Jusserand D, Michot JB, Bauer F, Maizel J, Slama M (2015) Early dynamic left intraventricular obstruction is associated with hypovolemia and high mortality in septic shock patients. *Crit Care* 19:262
50. Dugar S, Sato R, Chawla S, You JY, Wang X, Grimm R, Collier P, Lanspa M, Duggal A (2023) Is left ventricular systolic dysfunction associated with increased mortality among patients with sepsis and septic shock? *Chest* 163:1437–1447
51. Mihailescu T, Kikuni G, Awada A, Briki R, Unger P (2019) Latent left ventricular outflow tract obstruction in Takotsubo cardiomyopathy. *Eur Heart J Cardiovasc Imaging* 20:368
52. Swinger ME, O'Brien F, Freedberg RS, Kronzon I (1990) Dynamic left ventricular outflow obstruction after aortic valve replacement: a Doppler echocardiographic study. *J Am Soc Echocardiogr* 3:205–208
53. Patel H, Antoine SM, Funk M, Santana O (2011) Left ventricular outflow tract obstruction after bioprosthetic mitral valve replacement with preservation of the anterior leaflet. *Rev Cardiovasc Med* 12:48–51
54. Angue M, Soubirou L, Vandroux D, Cordier C, Martinet O, Gauzere BA, Braunberger E (2014) Beneficial effects of intravenous beta-blockers in Tako-Tsubo syndrome with dynamic left ventricular outflow tract obstruction and severe haemodynamic impairment. *Int J Cardiol* 177:e56–57
55. Balik M, Novotny A, Suk D, Matousek V, Maly M, Brozek T, Tavazzi G (2020) Vasopressin in patients with septic shock and dynamic left ventricular outflow tract obstruction. *Cardiovasc Drugs Ther* 34:685–688
56. Santoro F, Ieva R, Ferraretti A, Fanelli M, Musaico F, Tarantino N, Martino LD, Gennaro LD, Caldarola P, Biase MD, Brunetti ND (2016) Hemodynamic effects, safety, and feasibility of intravenous esmolol infusion during Takotsubo cardiomyopathy with left ventricular outflow tract obstruction: results from a multicenter registry. *Cardiovasc Ther* 34:161–166
57. Gargani L, Pugliese NR, Frassi F, Frumento P, Poggianti E, Mazzola M, De Biase N, Landi P, Masi S, Taddei S, Pang PS, Sicari R (2021) Prognostic value of lung ultrasound in patients hospitalized for heart disease irrespective of symptoms and ejection fraction. *ESC Heart Fail* 8:2660–2669
58. Gargani L, Girerd N, Platz E, Pellicori P, Stankovic I, Palazzuoli A, Pivetta E, Miglioranza MH, Soliman-Aboumarie H, Agricola E, Volpicelli G, Price S, Donal E, Cosyns B, Neskovic AN, This Document was Reviewed by Members of the ESDC (2023) Lung ultrasound in acute and chronic heart failure: a clinical consensus statement of the European Association of Cardiovascular Imaging (EACVI). *Eur Heart J Cardiovasc Imaging* 24:1569–1582
59. Lichtenstein DA, Meziere GA (2008) Relevance of lung ultrasound in the diagnosis of acute respiratory failure: the BLUE protocol. *Chest* 134:117–125
60. Laursen CB, Sloth E, Lassen AT, Christensen R, Lambrechtsen J, Madsen PH, Henriksen DP, Davidsen JR, Rasmussen F (2014) Point-of-care ultrasonography in patients admitted with respiratory symptoms: a single-blind, randomised controlled trial. *Lancet Respir Med* 2:638–646
61. Reissig A, Gramegna A, Aliberti S (2012) The role of lung ultrasound in the diagnosis and follow-up of community-acquired pneumonia. *Eur J Intern Med* 23:391–397
62. Haaksma ME, Heldeweg MLA, Lopez Matta JE, Smit JM, van Trigt JD, Nooitgedacht JS, Elzo Kraemer CV, van de Wiel M, Girbes ARJ, Heunks L, van Westerloo DJ, Tuinman PR (2020) Lung ultrasound findings in patients with novel SARS-CoV-2. *ERJ Open Res* 6
63. Copetti R, Soldati G, Copetti P (2008) Chest sonography: a useful tool to differentiate acute cardiogenic pulmonary edema from acute respiratory distress syndrome. *Cardiovasc Ultrasound* 6:16



64. Mongodi S, Pozzi M, Orlando A, Bouhemad B, Stella A, Tavazzi G, Via G, Iotti GA, Mojoli F (2018) Lung ultrasound for daily monitoring of ARDS patients on extracorporeal membrane oxygenation: preliminary experience. *Intensive Care Med* 44:123–124
65. Mongodi S, De Vita N, Salve G, Bonaiti S, Daverio F, Cavagnino M, Siano G, Amatu A, Maggio G, Musella V, Klersy C, Vaschetto R, Bouhemad B, Mojoli F (2022) The role of lung ultrasound monitoring in early detection of ventilator-associated pneumonia in COVID-19 patients: a retrospective observational study. *J Clin Med* 11
66. Dargent A, Chatelain E, Si-Mohamed S, Simon M, Baudry T, Kreitmann L, Quenot JP, Cour M, Argaud L, Group Cs (2021) Lung ultrasound score as a tool to monitor disease progression and detect ventilator-associated pneumonia during COVID-19-associated ARDS. *Heart Lung* 50:700–705
67. Mongodi S, Via G, Girard M, Rouquette I, Misset B, Braschi A, Mojoli F, Bouhemad B (2016) Lung ultrasound for early diagnosis of ventilator-associated pneumonia. *Chest* 149:969–980
68. Pasqueron J, Dureau P, Arcile G, Duceau B, Hariri G, Lepere V, Lebreton G, Rouby JJ, Bougle A (2022) Usefulness of lung ultrasound for early detection of hospital-acquired pneumonia in cardiac critically ill patients on venoarterial extracorporeal membrane oxygenation. *Ann Intensive Care* 12:43
69. Mojoli F, Bouhemad B, Volpicelli G, Mongodi S (2020) Lung ultrasound modifications induced by fiberoptic bronchoscopy may improve early bedside ventilator-associated pneumonia diagnosis: a case series. *Eur J Anaesthesiol* 37:946–949
70. Bouhemad B, Liu ZH, Arbelot C, Zhang M, Ferarri F, Le-Guen M, Girard M, Lu Q, Rouby JJ (2010) Ultrasound assessment of antibiotic-induced pulmonary reaeration in ventilator-associated pneumonia. *Crit Care Med* 38:84–92
71. Volpicelli G, Elbarbary M, Blaivas M, Lichtenstein DA, Mathis G, Kirkpatrick AW, Melniker L, Gargani L, Noble VE, Via G, Dean A, Tsung JW, Soldati G, Copetti R, Bouhemad B, Reissig A, Agricola E, Rouby JJ, Arbelot C, Liteplo A, Sargsyan A, Silva F, Hoppmann R, Breitkreutz R, Seibel A, Neri L, Storti E, Petrovic T, International Liaison Committee on Lung Ultrasound for International Consensus Conference on Lung U (2012) International evidence-based recommendations for point-of-care lung ultrasound. *Intensive Care Med* 38:577–591
72. Matthay MA, Arabi Y, Arroliga AC, Bernard G, Bersten AD, Brochard LJ, Calfee CS, Combes A, Daniel BM, Ferguson ND, Gong MN, Gotts JE, Herridge MS, Laffey JG, Liu KD, Machado FR, Martin TR, McAuley DF, Mercat A, Moss M, Mularski RA, Pesenti A, Qiu H, Ramakrishnan N, Ranieri VM, Riviello ED, Rubin E, Slutsky AS, Thompson BT, Twagirumugabe T, Ware LB, Wick KD (2024) A new global definition of acute respiratory distress syndrome. *Am J Respir Crit Care Med* 209:37–47
73. Biasucci DG, Loi B, Centorrino R, Raschetti R, Piastra M, Pisapia L, Consalvo LM, Caricato A, Grieco DL, Conti G, Antonelli M, De Luca D (2022) Ultrasound-assessed lung aeration correlates with respiratory system compliance in adults and neonates with acute hypoxic restrictive respiratory failure: an observational prospective study. *Respir Res* 23:360
74. Chiumello D, Mongodi S, Algieri I, Vergani GL, Orlando A, Via G, Crimella F, Cressoni M, Mojoli F (2018) Assessment of lung aeration and recruitment by CT scan and ultrasound in acute respiratory distress syndrome patients. *Crit Care Med* 46:1761–1768
75. Pierrakos C, Smit MR, Pisani L, Paulus F, Schultz MJ, Constantin JM, Chiumello D, Mojoli F, Mongodi S, Bos LDJ (2021) Lung ultrasound assessment of focal and non-focal lung morphology in patients with acute respiratory distress syndrome. *Front Physiol* 12:730857
76. Tuinman PR, Shi Z, Heunks L (2025) How we use ultrasound in the management of weaning from mechanical ventilation. *Intensive Care Med* 51:393–396
77. Charbit J, Millet I, Maury C, Conte B, Roustan JP, Taourel P, Capdevila X (2015) Prevalence of large and occult pneumothoraces in patients with severe blunt trauma upon hospital admission: experience of 526 cases in a French level 1 trauma center. *Am J Emerg Med* 33:796–801
78. Lichtenstein DA, Meziere G, Lascols N, Biderman P, Courret JP, Gepner A, Goldstein I, Tenoudji-Cohen M (2005) Ultrasound diagnosis of occult pneumothorax. *Crit Care Med* 33:1231–1238
79. Volpicelli G (2011) Sonographic diagnosis of pneumothorax. *Intensive Care Med* 37:224–232
80. Chan KK, Joo DA, McRae AD, Takwoingi Y, Premji ZA, Lang E, Wakai A (2020) Chest ultrasonography versus supine chest radiography for diagnosis of pneumothorax in trauma patients in the emergency department. *Cochrane Database Syst Rev* 7:CD013031
81. Abordeppey EA, Drewry AM, Beyer AB, Theodoro DL, Fowler SA, Fuller BM, Carpenter CR (2017) Diagnostic accuracy of central venous catheter confirmation by bedside ultrasound versus chest radiography in critically ill patients: a systematic review and meta-analysis. *Crit Care Med* 45:715–724
82. Mangold MS, Ruber F, Steinack C, Gautschi F, Wani J, Grimaldi S, Franzen DP (2023) Lung ultrasound for the exclusion of pneumothorax after interventional bronoscopies-a retrospective study. *J Clin Med* 12
83. Galbois A, Ait-Oufella H, Baudel JL, Kofman T, Bottero J, Viennot S, Rabate C, Jabbouri S, Bouzeman A, Guidet B, Offenstadt G, Maury E (2010) Pleural ultrasound compared with chest radiographic detection of pneumothorax resolution after drainage. *Chest* 138:648–655



84. Volpicelli G, Boero E, Sverzellati N, Cardinale L, Busso M, Boccuzzi F, Tullio M, Lamorte A, Stefanone V, Ferrari G, Veltri A, Frascisco MF (2014) Semi- quantification of pneumothorax volume by lung ultrasound. *Intensive Care Med* 40:1460–1467
85. Chiumello D, Marino A, Cressoni M, Mietto C, Berto V, Gallazzi E, Chi- urazzi C, Lazzarini M, Cadringher P, Quintel M, Gattinoni L (2013) Pleural effusion in patients with acute lung injury: a CT scan study. *Crit Care Med* 41:935–944
86. Hansell L, Milross M, Delaney A, Tian DH, Ntoumenopoulos G (2021) Lung ultrasound has greater accuracy than conventional respiratory assessment tools for the diagnosis of pleural effusion, lung consolidation and collapse: a systematic review. *J Physiother* 67:41–48
87. Begot E, Grumann A, Duvoid T, Dalmay F, Pichon N, Francois B, Clavel M, Vignon P (2014) Ultrasonographic identification and semiquantitative assessment of uniloculated pleural effusions in critically ill patients by residents after a focused training. *Intensive Care Med* 40:1475–1480
88. Laursen CB, Clive A, Halifax R, Pietersen PI, Asciak R, Davidsen JR, Bhat- nagar R, Bedawi EO, Jacobsen N, Coleman C, Edey A, Via G, Volpicelli G, Massard G, Raimondi F, Evison M, Konge L, Annema J, Rahman NM, Maskell N (2021) European Respiratory Society statement on thoracic ultrasound. *Eur Respir J* 57
89. Yang PC, Luh KT, Chang DB, Wu HD, Yu CJ, Kuo SH (1992) Value of sonography in determining the nature of pleural effusion: analysis of 320 cases. *AJR Am J Roentgenol* 159:29–33
90. Balik M, Plasil P, Waldauf P, Pazout J, Fric M, Otahal M, Pachl J (2006) Ultrasound estimation of volume of pleural fluid in mechanically ventilated patients. *Intensive Care Med* 32:318
91. Peris A, Tutino L, Zagli G, Batacchi S, Cianchi G, Spina R, Bonizzoli M, Migliaccio L, Perretta L, Bartolini M, Ban K, Balik M (2010) The use of point-of-care bedside lung ultrasound significantly reduces the number of radiographs and computed tomography scans in critically ill patients. *Anesth Analg* 111:687–692
92. Remerand F, Dellamonica J, Mao Z, Ferrari F, Bouhemad B, Jianxin Y, Arbe- lot C, Lu Q, Ichai C, Rouby JJ (2010) Multiplane ultrasound approach to quantify pleural effusion at the bedside. *Intensive Care Med* 36:656–664
93. Mika S, Gola W, Gil-Mika M, Wilk M, Misiollek H, (2024) Ultrasonographic applications of novel technologies and artificial intelligence in critically ill patients. *J Pers Med* 14
94. Gohar E, Herling A, Mazuz M, Tsaban G, Gat T, Kobal S, Fuchs L, (2023) Artificial intelligence (AI) versus POCUS expert: a validation study of three automatic AI-based, real-time, hemodynamic echocardiographic assessment tools. *J Clin Med* 12
95. Louart B, Muller L, Emond B, Boulet N, Roger C (2025) Agreement between manual and automatic ultrasound measurement of the velocity-time integral in the left ventricular outflow tract in intensive care patients: evaluation of the AUTO-VTI(R) tool. *J Clin Monit Comput* 39:355–364
96. Arntfield R, Wu D, Tschirhart J, VanBerlo B, Ford A, Ho J, McCauley J, Wu B, Deglint J, Chaudhary R, Dave C, VanBerlo B, Basmaji J, Millington S (2021) Automation of lung ultrasound interpretation via deep learning for the classification of normal versus abnormal lung parenchyma: a multicenter study. *Diagnostics (Basel)* 11
97. Tsai CH, van der Burgt J, Vukovic D, Kaur N, Demi L, Carty D, Wang A, Royse A, Royse C, Haji K, Dowling J, Chetty G, Fontanarosa D (2021) Auto- matic deep learning-based pleural effusion classification in lung ultra- sound images for respiratory pathology diagnosis. *Phys Med* 83:38–45
98. Clausdorff Fiedler H, Prager R, Smith D, Wu D, Dave C, Tschirhart J, Wu B, Van Berlo B, Malthaner R, Arntfield R (2024) Automated real-time detec- tion of lung sliding using artificial intelligence: a prospective diagnostic accuracy study. *Chest* 166:362–370
99. Kessler D, Zhu M, Gregory CR, Mehanian C, Avila J, Avitable N, Coney- beare D, Das D, Dessie A, Kennedy TM, Rabiner J, Malia L, Ng L, Nye M, Vindas M, Weimersheimer P, Kulhare S, Millin R, Gregory K, Zheng X, Horning MP, Stone M, Wang F, Lancioni C (2024) Development and test- ing of a deep learning algorithm to detect lung consolidation among children with pneumonia using hand-held ultrasound. *PLoS ONE* 19:e0309109
100. Baloescu C, Chen A, Varasteh A, Hall J, Toporek G, Patil S, McNamara RL, Raju B, Moore CL (2024) Deep- learning generated B-line score mirrors clinical progression of disease for patients with heart failure. *Ultrasound J* 16:42
101. Duclos G, Bobbia X, Markarian T, Muller L, Cheyssac C, Castillon S, Resseguier N, Boussuges A, Volpicelli G, Leone M, Zieleskiewicz L (2019) Speckle tracking quantification of lung sliding for the diagnosis of pneumothorax: a multicentric observational study. *Intensive Care Med* 45:1212–1218
102. Fissore E, Zieleskiewicz L, Markarian T, Muller L, Duclos G, Bourgoin M, Michelet P, Leone M, Claret PG, Bobbia X (2021) Pneumothorax diagno- sis with lung sliding quantification by speckle tracking: a prospective multicentric observational study. *Am J Emerg Med* 49:14–17
103. Piculjan A, Sustic M, Brumini G, Kuharic J, Sustic A (2020) Reliability of B-line quantification by different-level observers and a software algorithm using point-of-care lung ultrasound. *J Clin Monit Comput* 34:1259–1264
104. Prager R, Fiedler HC, Smith D, Wu D, Arntfield R (2025) Interrater agreement of physicians identifying lung sliding artifact on B-mode and M-mode point of care ultrasound (POCUS). *POCUS J* 10:92–98



105. Nhat PTH, Van Hao N, Tho PV, Kerdegari H, Pisani L, Thu LNM, Phuong LT, Duong HTH, Thuy DB, McBride A, Xochicale M, Schultz MJ, Razavi R, King AP, Thwaites L, Van Vinh Chau N, Yacoub S, Consortium V, Gomez A (2023) Clinical benefit of AI-assisted lung ultrasound in a resource- limited intensive care unit. *Crit Care* 27:257
106. Howell L, Ingram N, Lapham R, Morrell A, McLaughlan JR (2024) Deep learning for real-time multi-class segmentation of artefacts in lung ultrasound. *Ultrasonics* 140:107251
107. Al-Zogbi L, Singh V, Teixeira B, Ahuja A, Bagherzadeh PS, Kapoor A, Sacidi H, Fleiter T, Krieger A (2021) Autonomous robotic point-of-care ultrasound imaging for monitoring of COVID-19-induced pulmonary diseases. *Front Robot AI* 8:645756
108. Hu H, Huang H, Li M, Gao X, Yin L, Qi R, Wu RS, Chen X, Ma Y, Shi K, Li C, Maus TM, Huang B, Lu C, Lin M, Zhou S, Lou Z, Gu Y, Chen Y, Lei Y, Wang X, Wang R, Yue W, Yang X, Bian Y, Mu J, Park G, Xiang S, Cai S, Corey PW, Wang J, Xu S (2023) A wearable cardiac ultrasound imager. *Nature* 613:667–675
109. Zieleskiewicz L, Muller L, Lakhai K, Meresse Z, Arbelot C, Bertrand PM, Bouhemad B, Cholley B, Demory D, Duperret S, Duranteau J, Guervilly C, Hammad E, Ichai C, Jaber S, Langeron O, Lefrant JY, Mahjoub Y, Maury E, Meaudre E, Michel F, Muller M, Nafati C, Perbet S, Quintard H, Riu B, Vigne C, Chaumoitre K, Antonini F, Allaouchiche B, Martin C, Constantin JM, De Backer D, Leone M, Car'Echo, AzuRea Collaborative N (2015) Point-of-care ultrasound in intensive care units: assessment of 1073 procedures in a multicentric, prospective, observational study. *Intensive Care Med* 41:1638–1647

Дополнительные материалы 1.

Ультразвуковое исследование грудной клетки: глоссарий, нормальные значения, методика записи.

Словарь

- **E: E wave velocity:** Скорость Е-волны: Максимальная диастолическая скорость Е-волны митрального клапана, регистрируемая с помощью импульсно-волновой допплерографии в левом желудочке, на конце митральных клапанов. Она отражает раннее пассивное наполнение левого желудочка и, в частности, градиент давления между левым желудочком и левым предсердием. Она варьируется в зависимости от диастолической функции и объема крови.
- **A: A wave velocity** Скорость А-волны: Максимальная диастолическая скорость Е-волны митрального клапана, регистрируемая с помощью импульсно-волновой допплерографии в левом желудочке, на конце митральных клапанов. Она отражает позднее диастолическое наполнение левого желудочка под воздействием сокращения левого предсердия.
- **E': E': E' wave velocity:** Скорость Е'-волны: Максимальная диастолическая скорость Е'-волны митрального кольца, регистрируемая с помощью тканевой допплерографии. В отличие от скоростей волн Е или А, этот показатель регистрирует не скорость кровотока, а скорость сердечной ткани и, следовательно, отражает внутренние диастолические свойства миокарда.
- **E/E' ratio** Соотношение Е/Е': отношение двух максимальных скоростей. Оно косвенно отражает конечно-диастолическое давление наполнения левого желудочка.
- **LVEF: left ventricle ejection fraction** ФВЛЖ: фракция выброса левого желудочка. Референтным методом является методика Симпсона, которая позволяет измерять конечно-диастолический и систолический объемы левого желудочка (КДЛЖ и КЭСЛЖ). После измерения объемов ФВЛЖ рассчитывается программным обеспечением аппарата по следующей формуле: (КДЛЖ - КЭСЛЖ / КДЛЖ), выраженной в процентах.
- **Longitudinal left ventricle strain** Продольная деформация левого желудочка: регистрируется с помощью аппарата с технологией спекл-трекинга. Деформация регистрирует внутреннее укорочение сердечной мышцы во время систолы и считается хорошим параметром систолической функции. Тем не менее, гиповолемия может



влиять на деформацию левого желудочка, поэтому ее оценку следует проводить только при отсутствии зависимости от преднагрузки.

- **MAPSE: mitral annulus plane systolic excursion** MAPSE: систолическая экскурсия плоскости митрального кольца — это расстояние (мм) между систолическим (максимальным) и диастолическим (минимальным) движением митрального кольца за сердечный цикл. MAPSE коррелирует с ФВЛЖ.
- **S' wave velocity:** Скорость S'-волны: максимальная систолическая скорость S'-волны митрального кольца, регистрируемая с помощью тканевой допплерографии. S' коррелирует с ФВЛЖ.
- **Subaortic Velocity time integral** Интеграл скорости по времени в субаортальном отделе: это расстояние, полученное путем построения контурного спектра потока выброса из выходного тракта левого желудочка, регистрируемого с помощью импульсно-волновой допплерографии. Он непосредственно отражает ударный объем левого желудочка.
- **EDT: E deceleration time:** время замедления Е — это время от максимальной скорости Е-волны до возвращения к базальной линии. Давление в левом желудочке повышается в большей степени при более коротком TDE. Этот параметр представляет интерес в случае фибрилляции предсердий.
- **IVC: inferior vena cava** НПВ: нижняя полая вена. Диаметр НПВ изменяется в зависимости от дыхательного цикла. Дыхательная вариация НПВ рассчитывается по следующей формуле: (максимальный диаметр - минимальный диаметр / максимальный диаметр), выраженной в процентах.
- **TR Vmax: maximal value of tricuspid regurgitation velocity** TR Vmax: максимальное значение скорости триkuspidальной регургитации, регистрируемое с помощью непрерывного допплеровского исследования в правой камере сердца. Он напрямую отражает градиент давления между правым желудочком и правым предсердием (полученный по формуле $(4V_{max}^2)$, автоматически рассчитываемой всеми эхокардиографами) и, следовательно, напрямую отражает систолическое и среднее артериальное давление в легочной артерии. Систолическое артериальное давление в легочной артерии можно получить путем сложения давления в правом предсердии, измеренного либо центральным катетером, либо оцененного по респираторным колебаниям диаметра нижней полой вены. В последних рекомендациях предлагается регистрировать только TR Vmax, чтобы упростить измерение и избежать аппроксимации, выполняемой при оценке давления в правом предсердии.

TAPSE: tricuspid annulus plane systolic excursion систолическая экскурсия плоскости триkuspidального кольца — это расстояние (мм) между систолическим (максимальным) и диастолическим (минимальным) движением триkuspidального кольца за сердечный цикл. TAPSE коррелирует с фракцией выброса правого желудочка.



Таблица S1. Ультразвуковое исследование грудной клетки: нормальные значения

LVOT: выходной тракт левого желудочка. BSA: площадь поверхности тела

*необходима консультация специалиста-кардиолога.

Параметр	Нормальное значение	Ограничения
Систолическая функция левого желудочка		
Фракция выброса левого желудочка (метод Симпсона)	> 52%	Трудоемкий
Систолическая экскурсия плоскости митрального кольца (MAPSE)	> 10 мм	Вариабельность при оценке разными специалистами.
Скорость S-волны митрального кольца	≥ 8 см/с	Неприменимо при наличии клапанного протеза*.
Продольная деформация левого желудочка	- 14 до - 22 %	Неприменимо при наличии клапанного протеза*.
Визуальная оценка	Нормальное / Умеренное / Тяжелое	Требует использования специального оборудования. Зависит от оператора.
Ударный объем – Сердечный индекс		
Субаортальный интеграл скорости кровотока VTI	14 – 20	
Сердечный индекс		
Субаортальный интеграл скорости кровотока × площадь × ЧСС / ППТ	> 2,5 л/мин/м ²	
Конченое диастолическое давление ЛЖ – диастолическая функция левого желудочка.		
Максимальная скорость волны E	0,7 – 1,2 м/с	Не применимо при наличии протеза клапана или выраженной патологии клапана*.
Максимальная скорость волны A	0,3 – 0,9 м/с	Не применимо при фибрилляции предсердий (отсутствие волны A).
Соотношение E/A	< 1 если возраст > 65 years 1 to 2 если возраст < 65 years.	Не применимо при наличии протеза клапана или выраженной патологии клапана*.



Время замедления волны Е (EDT)	> 140 при синусовом ритме > 160 при фибрилляции предсердий	Не применимо при наличии протеза клапана или выраженной патологии клапана*.
Максимальная скорость волны Е' митрального кольца	> 10 см/с	Не применимо при наличии протеза клапана или выраженной патологии клапана.
Соотношение Е/Е'	< 14 при синусовом ритме < 11 при фибрилляции предсердий.	Не применимо при наличии протеза клапана или выраженной патологии клапана*.
Индексированный объем левого предсердия (метод Симпсона)	< 34 мл/м ²	
Резервная деформация левого предсердия[1]	> 18 %	Требуется определённое оборудование. Зависит от оператора.
Давление в правом желудочке – давление в легочной артерии и давление в правом предсердии		
Систолическая экскурсия плоскости триkuspidального кольца (TAPSE)	≥ 16 мм	Не применимо при наличии клапанного протеза или серьезной патологии клапана.
Максимальная скорость S-волны триkuspidального кольца	≥ 10 см/с	Не применимо при наличии клапанного протеза.
Фракция выброса правого желудочка	> 35%	Зависит от оператора.
Систолическое давление в легочной артерии	< 35 мм Hg	
Время ускорения в легочной артерии	> 100 мс	
Респираторные вариации диаметра нижней полой вены	< 40 %	Нормальное значение не исключает реакции на внутривенное введение жидкости.
Респираторные вариации диаметра верхней полой вены (транзэзофагеальная эхокардиография)	< 40%	
Максимальная скорость триkuspidальной регургитации	< 2,5 м/с	



Утолщение боковой стенки правого желудочка	< 5 мм	
Визуальная оценка соотношения диастолической поверхности правого и левого желудочков	< 1	
Ультразвуковое исследование легких: нормальные показатели функции легких (Рисунок S6)		
Скольжение легких в В-режиме	Настоящее время	
Скольжение легких в М-режиме	Настоящее время: «признак морского берега»	
Плевральная линия	Тонкий, правильный, однородный в каждой интересующей области	
А-линии	Настоящее время	
В-линии	Отсутствует	
Консолидации	Отсутствует	
Плевральный выпот	Отсутствует	
Пульс легких	Отсутствует	
Точка легкого	Отсутствует	

Таблица S2. Ультразвуковое исследование грудной клетки: методы регистрации.

Параметр	Вид	Режим визуализации/допплерографии	Область интересов
Cardiac parameters			
Интеграл скорости кровотока в субаортальном отделе	Апикальная 5 камер	Импульсно-волновой допплер	Выходной тракт левого желудочка
Систолическая экскурсия плоскости митрального кольца (MAPSE)	Апикальная 4 камеры	М-режим	Боковое или септальное митральное кольцо
Митральный приток: волны E и A	Апикальная 4 или 5 камер	Импульсно-волновой допплер	Конец створок митрального клапана
Волна E' митрального клапана	Апикальная 4 или 5 камер	Тканевой допплер	Боковое или септальное митральное кольцо
Фракция выброса левого желудочка	Апикальная 4 камеры	-	Левый желудочек
Волна S' митрального клапана	Апикальная 4 камеры	Тканевой допплер	Боковое митральное кольцо
Нижняя полая вена	Подреберные Апикальная 4 камеры	В-режим и М-режим	Правое предсердие и внутрипеченочная



			часть нижней полой вены
Верхняя полая вена	Среднепищеводный вид, трансэзофагеальное исследование, угол от 0° до 30°.	В-режим и М-режим	Правое предсердие и внутрипеченочная часть нижней полой вены
Систолическая экскурсия плоскости триkuspidального кольца (TAPSE)	Апикальная 4 камеры	М-режим	Боковое триkuspidальное кольцо
Волна S' триkuspidального клапана	Апикальная 4 камеры	Тканевой допплер	Боковое триkuspidальное кольцо
Фракция выброса правого желудочка	Апикальная 4 камеры	2D	Правый желудочек
Время ускорения в легочной артерии	Параастернальная короткая ось	Импульсно-волновой допплер	Выход из правого желудочка на уровне кольца легочного клапана
Тrikuspidальная регургитация	Апикальная 4 или 5 камер	Непрерывный допплер	Правый желудочек и предсердия
Утолщение свободной стенки правого желудочка	Подреберные 4 камеры	2D	Правый желудочек
Оценка острого респираторного дистресс-синдрома по данным ультразвукового исследования легких			
Скользжение легкого с А-линиями Оценка = 0, нормальное легкое И/или В-линии - Оценка = 1, если В-линии видны менее чем на 50% визуализированной плевры в анализируемой области интереса (ROI). Оценка = 2, если В-линии > 50% визуализированной плевры в ROI И/или Консолидация Оценка = 3	2 передних проекции с правой и левой стороны 2 боковых проекции с правой и левой стороны 2 заднебоковых проекции с правой и левой стороны	2D	Оценка по ультразвуковому исследованию легких определяется как сумма баллов по 12 областям интереса (ROI). Оценка по ультразвуковому исследованию легких коррелирует со смертностью.

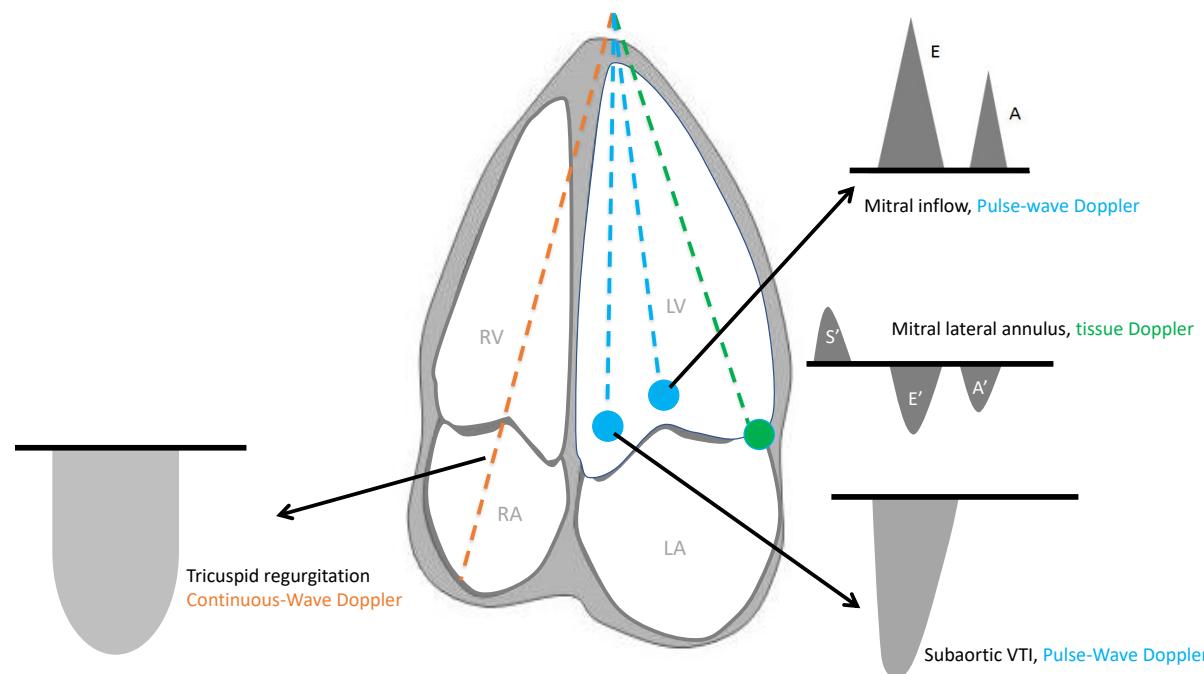


Рисунок S1. Допплеровские методы для гемодинамической оценки с помощью эхокардиографии. Все допплеровские спектры получены из апикального пятикамерного изображения для того, чтобы синхронизировать допплеровские данные с кровотоком или продольным движением сердечного кольца. VTI: интеграл скорости кровотока.

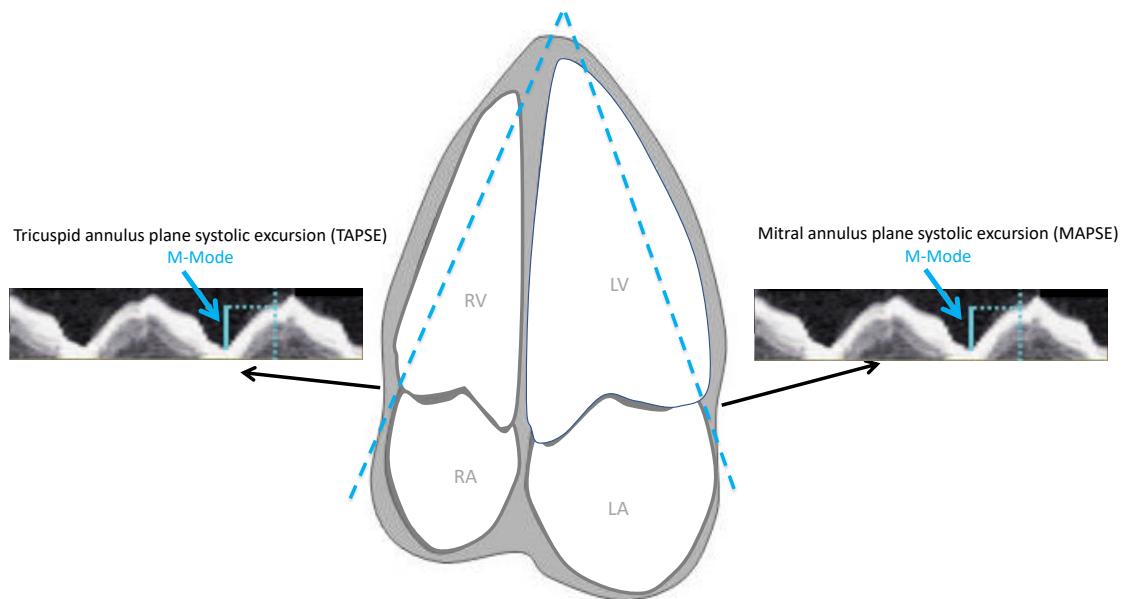


Рисунок S2. Систолическая экскурсия плоскости митрального и триkuspidального колец (MAPSE и TAPSE). Эти два параметра получены из апикального изображения 4/5 камер в В-режиме, в сочетании с изображением в М-режиме

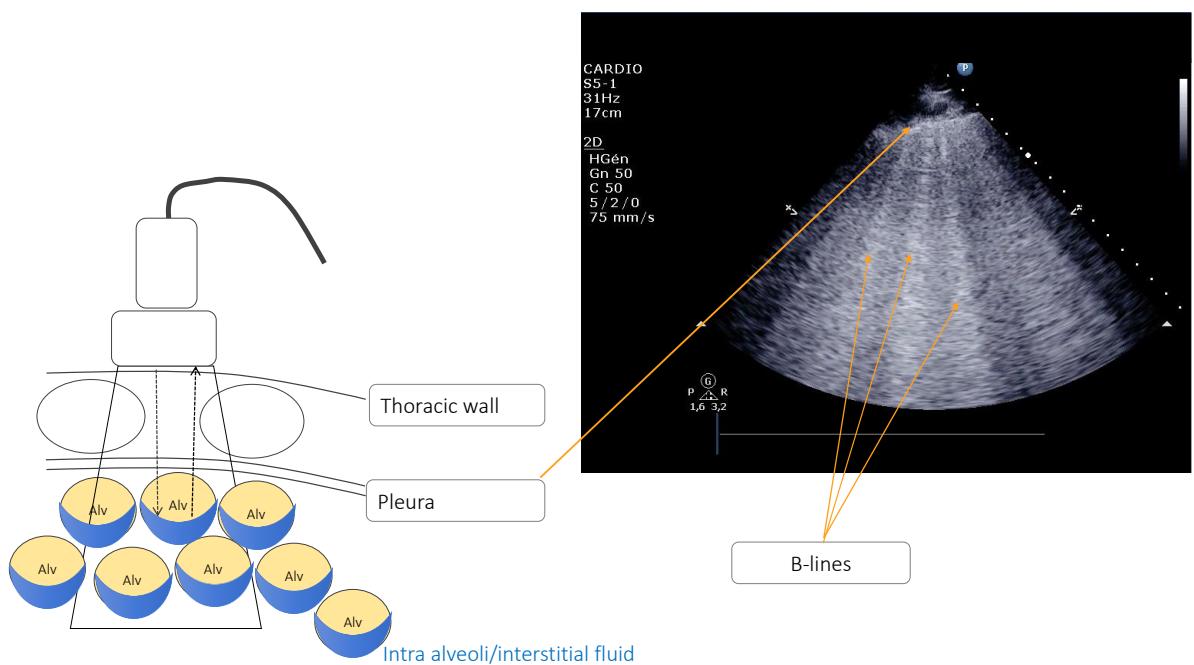


Рисунок S3. Ультразвуковое исследование легких, показывающее В-линии. В-линии — это гиперэхогенные артефакты, возникающие на границе раздела жидкость-газ, исходящие из плевры, перпендикулярные плевральной линии, подвижные при дыхательных движениях (скольжение легких). В-линии связаны с избытком жидкости в альвеолах и/или паренхиме легких (кардиогенный отек, пневмония, ОРДС, ушиб легких у пациентов с травмами).

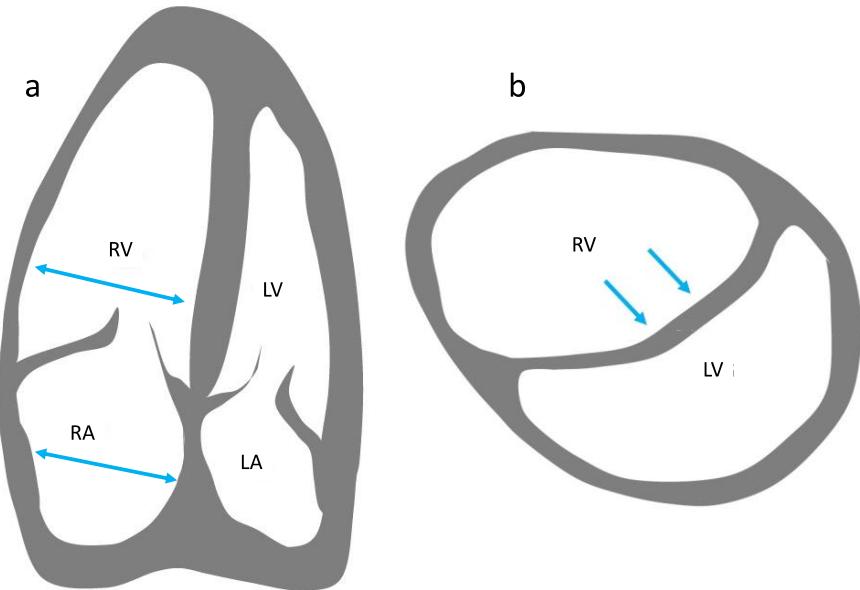
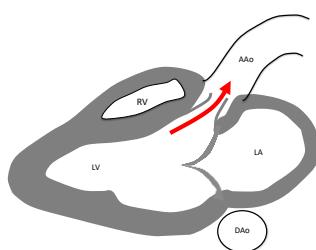


Рисунок S4. Острое легочное сердце. Острое увеличение постнагрузки правого желудочка в случае легочной эмболии или гипоксической легочной вазоконстрикции во время тяжелого острого респираторного дистресс-синдрома приводит к двум эхокардиографическим паттернам: острое расширение правого желудочка и предсердий на апикальном четырехкамерном изображении (а). Парадоксальная перегородка на парастернальном короткоосевом изображении (б).



5a



5b

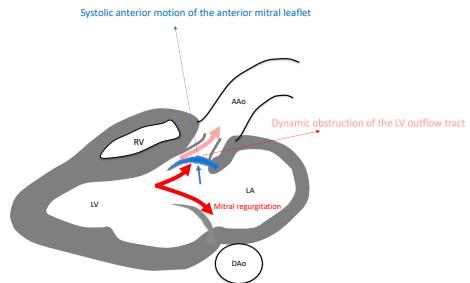
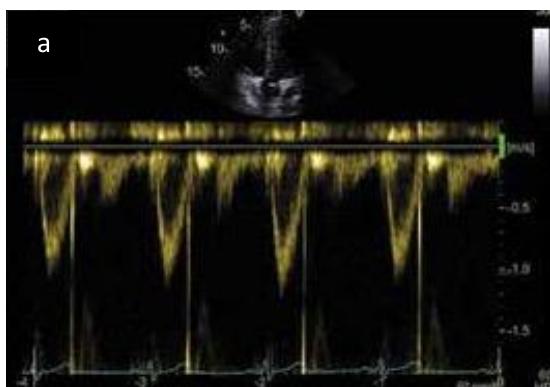


Рисунок S5. Динамическая обструкция выходного тракта левого желудочка в паастернальной проекции по длинной оси.

5a: нормальный систолический выброс (красная стрелка). 5b: динамическая обструкция выходного тракта левого желудочка (розовая стрелка), связанная с систолическим передним движением передней части митрального клапана (синий цвет) и последующей митральной регургитацией (красная стрелка). ЛЖ: левый желудочек, ПЖ: правый желудочек, ЛП: левое предсердие, ППП: правое предсердие, ААо: восходящая аорта, ДАо: нисходящая аорта.

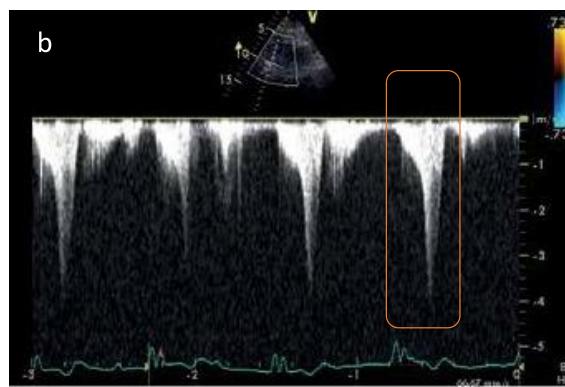
Normal (a)

Normal subaortic VTI Laminar flow



LVOT dynamic obstruction (b)

Dagger/saber-shaped flow on continuous wave Doppler



Sub aortic VTI $V_{max} < 1,5$ m/s (Pulse-Wave Doppler)

$V_{max} = 4$ m/s (Continuous Doppler)

Figure 1Рисунок S6. Допплеровская картина нормального субаортального ИСК (импульсно-волновой допплер) (а) и динамической обструкции выходного тракта левого желудочка (LVOT) в апикальной пятикамерной проекции (б) с высокой скоростью (что подразумевает использование непрерывноволнового допплера) и потоком в форме кинжала (оранжевый прямоугольник). VTI: интеграл скорости по времени. Vmax: максимальная скорость ИСК

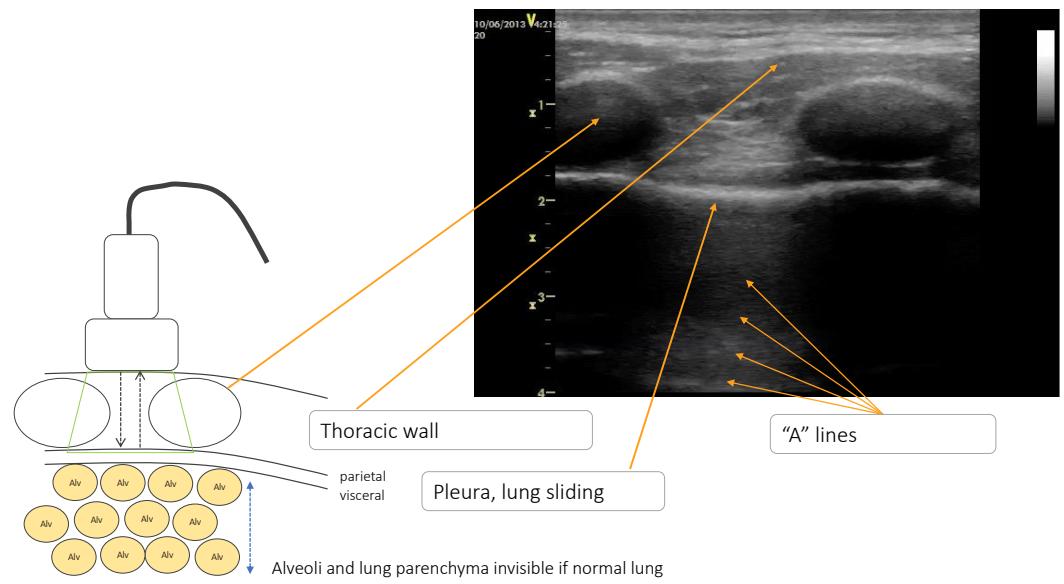


Рисунок S7. Нормальное ультразвуковое исследование легких. Alv = альвеолы.

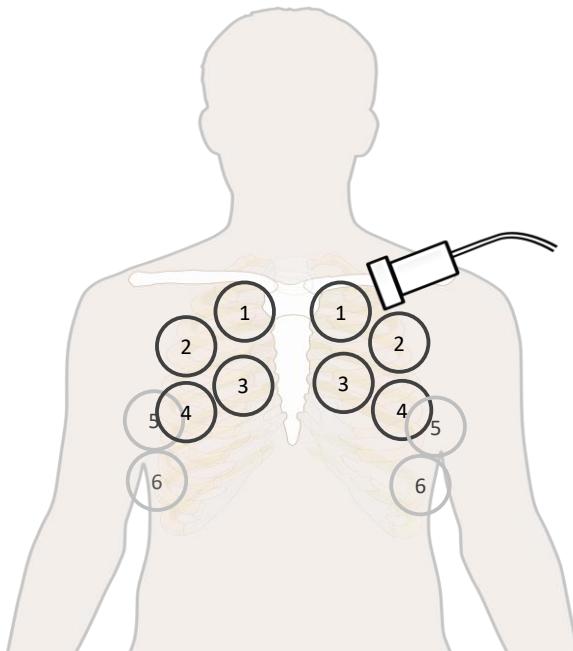


Рисунок S8. Ультразвуковое исследование легких требует исследования как минимум шести областей интереса с каждой стороны. 12 областей интереса необходимы для того, чтобы не пропустить очаговые аномалии, и требуются для определения баллов ультразвукового исследования легких.