

ГЛАВА 7. УЛЬТРАЗВУКОВЫЕ МЕТОДЫ В ПУЛЬМОНОЛОГИИ

Г.В. Неклюдова, Ж.К. Науменко, В.А. Новиков, Г.М. Галстян, Е.Н. Паровичникова

CHAPTER 7. ULTRASOUND METHODS IN PULMONOLOGY

Galina V. Nekludova, Zhanna K. Naumenko, Viacheslav A. Novikov,
Gennady M. Galstyan, Elena N. Parovichnikova

Ультразвуковые (УЗ) методы исследования по праву занимают ключевые позиции в диагностическом процессе при многих заболеваниях различных органов и систем. Ультразвуковое исследование (УЗИ) органов грудной клетки связано с объективными затруднениями. Прежде всего, это невозможность визуализации структур в глубине легочной ткани, так как воздушная ткань легких полностью отражает ультразвук. Кроме того, у некоторых пациентов узкие межреберные промежутки ограничивают ультразвуковое окно. УЗИ в пульмонологии не рассматривается как базисный инструмент диагностического поиска, но в качестве дополнительного метода может принести существенные коррективы в постановку диагноза, а следовательно, и в назначенное лечение. Основная диагностическая информация может быть получена при классическом двухмерном серошкальном сканировании (за исключением эхокардиографии – ЭхоКГ), что не требует дополнительного оборудования или специального программного обеспечения.

В пульмонологии одной из актуальных задач УЗИ является обнаружение жидкости в плевральных полостях. Данный метод позволяет выявить минимальное количество жидкости, а при необходимости пунктирования плевральной полости с помощью УЗИ можно четко указать регион наибольшего скопления жидкости, т. е. выбрать наиболее подходящее место для пункции.

Нередко уже при первом осмотре пациента, жалующегося на одышку или кашель, требуется уточнение причины возникновения данных симптомов: недостаточность со стороны сердечно-сосудистой системы или заболевания органов дыхания. В этом случае большую помощь может оказать ЭхоКГ, позволяющее выявить патологию со стороны левых отделов сердца, оценить состояние правых отделов сердца и давление в легочной артерии (ЛА). Кроме того, УЗИ помогает обнаружить жидкость не только в плевральных полостях, но и в полости перикарда.

Нередко при подозрении на тромбоз легочной артерии (ТЭЛА) врачи-пульмонологи дополнительно к ЭхоКГ назначают дуплексное сканирование сосудов нижних конечностей для выявления тромбов.

При саркоидозе с помощью УЗИ можно исключить или подтвердить увеличение периферических лимфоузлов и оценить их структуру. При параличе диафрагмы УЗИ позволяет выявить снижение ее экскурсии или парадоксальное движение. В некоторых случаях косвенным подтверждением лимфангиолейомиоматоза (ЛАМ) могут служить обнаруженные при УЗИ гемангиомы печени или ангиомиолипомы почек.

Физика ультразвука

Частота УЗ-излучения, используемого в медицине, составляет от 2 до 20 МГц. Отражение УЗ-волны является основой для получения ультразвукового изображения и зависит от разницы УЗ-характеристик тканей или импеданса. На границе между двумя тканевыми структурами с различной проницаемостью для УЗ-волн (или различным импедансом) УЗ-импульс частично отражается. Чем больше разница акустического импеданса, тем сильнее отражение сигнала. Разница в импедансе между воздухом и тканями – наибольшая, поэтому почти вся энергия УЗ-луча отражается обратно. Использование специального геля позволяет удалить воздух между датчиком и кожным покровом исследуемого, что дает возможность УЗ-лучу проникнуть в ткани. Энергия отраженного УЗ-сигнала характеризуется амплитудой и временем получения отраженного сигнала. Амплитуда сигнала показывает, как много энергии УЗ-излучения отражено от исследуемой структуры; время связано с расстоянием от датчика до мишени [1].

Ультразвуковые режимы

В настоящее время используются следующие режимы. В-режим – амплитуда энергии в виде пятен различной яркости позволяет получить обычное двумерное УЗ-изображение, а М-режим (или режим движения, от англ. *motion*) – положение изображения конкретного объекта, которое представлено относительно оси времени (оси X). Допплерография используется для регистрации движения крови или тканевых структур [1]. Традиционно принято, что красный цвет обозначает объекты, движущиеся

в сторону датчика, а синий цвет — обозначает объекты, движущиеся от датчика. Для получения оптимального изображения в режиме доплеровского исследования сигнал, излучаемый датчиком, должен распространяться вдоль оси движения исследуемой структуры или потока. В отличие от доплеровского режима, исследования для оптимального и корректного получения изображения в М-режиме необходимо, чтобы луч сканирования проходил перпендикулярно оси изучаемого объекта. В эхокардиографии все шире внедряются такие современные технологии, как методики *strain* и *strain rate*, позволяющие исследовать деформацию и скорость деформации сегментов миокарда [2]. Технология *Speckle Tracking Imaging* (методика 2D-*strain*) основана на отслеживании перемещения естественных акустических зернистых структур миокарда на серошкальном изображении в В-режиме, благодаря чему можно оценивать движение миокарда, в т. ч. в апикальных сегментах. Кроме того, при использовании данной методики оценивают деформацию и скорость деформации волокон миокарда одновременно в продольном и радиальном направлениях.

При УЗИ сердца, легких или плевральных полостей используют УЗ излучение с частотой 3–6 МГц. Этот диапазон излучения является оптимальным компромиссом между пространственным разрешением и глубиной проникновения в ткани грудной полости.

Для получения наилучшего изображения необходимо выбрать оптимальную глубину сканирования. При УЗИ грудной полости глубина, как правило, составляет 10 см. Меньшая глубина улучшает изображение ближайшего поля, например плевральной поверхности, при этом используют УЗ-излучение с частотой 6–12 МГц [4, 5].

Интерпретация изображения

С помощью УЗИ визуализируются 2 типа изображения, а именно анатомические структуры и артефакты. Плотность анатомических структур определяется при сравнении с плотностью паренхимы печени, которую в норме принято считать изоэхогенной. Менее плотные структуры характеризуются как гипозэхогенные или анэхогенные. Акустическая плотность гиперэхогенных структур значительно превосходит акустическую плотность печени, в качестве примера можно привести изображение ребер или воздуха. Другой характеристикой анатомических структур является однородность. Артефакты изображения не соответствуют конкретной анатомической структуре, примеры — акустические тени от костных структур, кальцинатов, усиление УЗ-сигнала дистальнее жидкостной структуры, эффект реверберации. Реверберация — это чередование темных и белых линий, возникающих при многократном отражении УЗ-луча между 2 поверхностями с различными акустическими свойствами. Данный эффект наблюдается, например, на границе ткани и воздуха.

В отличие от анатомических структур, артефакты перемещаются с движением датчика [6–8].

УЗИ в пульмонологии

Эхокардиография в пульмонологии

В клинической практике наиболее востребованным методом УЗИ органов грудной полости является ЭхоКГ, традиционно используемая врачами-кардиологами. Однако нередко врачам-пульмонологам важно определить, преобладает патология со стороны левых или правых отделов сердца и выявить признаки легочной гипертензии (ЛГ).

Наиболее доступным и точным методом диагностики легочного сердца (ЛС) является ЭхоКГ. ЛС ассоциировано с легочной артериальной гипертензией, являющейся следствием заболеваний, нарушающих функцию и/или структуру легких [9]. Этот термин не используется для описания изменений правого желудочка (ПЖ) при патологии левых отделов сердца, его врожденных и приобретенных пороках. Чаще всего причиной ЛС является хроническая обструктивная болезнь легких, интерстициальные заболевания легких, но ЛС может развиваться и при муковисцидозе, деформации грудной клетки, ожирении и т.д.

В настоящее время понятие ЛС уходит на второй план, а паттерн структурных изменений сердца при ЛГ на фоне заболеваний легких характерен для прекапиллярного варианта ЛГ. Согласно современной классификации, данный вариант ЛГ отнесен к 3-й группе, которая обозначена как «ЛГ, связанная с заболеваниями легких и/или гипоксией» [10]. К прекапиллярному варианту ЛГ, кроме того, относится легочная артериальная гипертензия, а также ЛГ, связанная с обструкцией ЛА. При этих патологических состояниях развивается аналогичный вариант гемодинамических изменений и ремоделирования сердца.

Повышение давления в ЛА приводит к гипертрофии и дилатации ПЖ, а со временем — и к его недостаточности ПЖ. Таким образом, основными ЭхоКГ признаками данного варианта ЛГ являются гипертрофия ПЖ и/или расширение ПЖ и правого предсердия (ПП), парадоксальное движение межжелудочковой перегородки вследствие прекапиллярного повышения давления в легочной артерии. При отсутствии ЛГ толщина свободной стенки ПЖ, измеренная при УЗИ, не превышает 5 мм [2]. В норме верхушка сердца образована левым желудочком, размер ПЖ составляет около 60% размера левого желудочка (ЛЖ). При умеренной дилатации ПЖ его размер сопоставим с размером ЛЖ и наряду с ЛЖ участвует в формировании верхушки сердца. При прогрессировании дилатации ПЖ отмечается преобладание размеров ПЖ над ЛЖ. В этом случае при визуальной оценке ультразвукового изображения верхушка сердца будет образована преимущественно ПЖ. Дилатация ПЖ приводит к ремоделированию

ЛЖ. Увеличенный ПЖ поджимает ЛЖ и по механизму межжелудочкового взаимодействия, вызывает нарушение наполнения ЛЖ, что приводит к снижению ударного объема последнего [11]. Помимо диастолического взаимодействия желудочков, которое рассматривают как желудочковую конкуренцию за диастолическое наполнение в ограниченном перикардальном пространстве, существует и систолическое взаимодействие. По данным разных авторов, систолическая функция ПЖ на 20–40% зависит от систолической функции ЛЖ [12, 13].

Следствием повышения давления в ПЖ является патологическая трикуспидальная регургитация (ТР), что приводит к перегрузке и дилатации ПП. Для оценки величины ПП определяют абсолютные и относительные линейные размеры ПП, а также его площадь, объем и индекс объема ПП. Среднее значение нормальной величины площади ПП – $13,5 \pm 2,0 \text{ см}^2$ [14]. В исследовании *H. Muller et al.* [15] у здоровых людей нижняя граница нормальных значений этого показателя при 95%-ном доверительном интервале (ДИ) равнялась 10 см^2 , а верхняя – 18 см^2 . Ремоделирование ПП имеет высокую чувствительность и специфичность неблагоприятного клинического исхода [14].

Расчет параметров систолической функции ПЖ затруднен из-за формы ПЖ и положения сердца в грудной клетке. В настоящее время предложены различные подходы к оценке систолической функции ПЖ с помощью ЭхоКГ. Есть мнения, что, в отличие от ЛЖ, наибольший вклад в систолическую функцию ПЖ вносит его продольное укорочение [16]. Поэтому для оценки систолической функции ПЖ наиболее достоверен анализ его изменения вдоль продольной оси. Один из наиболее простых и воспроизводимых методов – определение амплитуды движения фиброзного кольца ТК, которая отражает движение основания ПЖ к его верхушке. Измерение систолической экскурсии фиброзного кольца трикуспидального клапана (*tricuspid anular plane systolic excursion* – TAPSE) проводится в М-режиме, курсор располагается в области фиброзного кольца трикуспидального клапана (ТК) в проекции свободной стенки ПЖ. Исследование рекомендуется проводить из апикального 4-камерного доступа, поскольку при этом направление движения фиброзного кольца ТК наиболее близко к распространению луча сканирования. В норме TAPSE составляет $\geq 20 \text{ мм}$. О систолической дисфункции ПЖ достоверно свидетельствует показатель TAPSE $< 17 \text{ мм}$ [2]. Проведенные исследования доказали, что величина TAPSE коррелирует с фракцией выброса ПЖ [17–20]. Внедрение тканевого доплеровского режима исследования дало возможность разработать еще один подход к оценке систолической функции ПЖ. Он основан на определении скорости систолического движения базального сегмента свободной стенки ПЖ (S') [21, 22]. Значение S' менее 10 см/с является надежным предиктором снижения сердечного индекса $< 2,2 \text{ л/мин} \cdot \text{м}^2$ [23].

Исследование деформации и скорости деформации (*strain* и *strain rate*) сегментов миокарда является еще одним важным аспектом при оценке систолической функции ПЖ. Использование тканевой доплерографии для анализа деформации миокарда имеет существенное ограничение, а именно, уголзависимость результата исследования, что может привести к ошибке измерения. Технология *Speckle Tracking Imaging*, в свою очередь, является угломнезависимой, поэтому позволяет определять функцию миокарда в т. ч. и апикальных сегментов. Кроме того, данная методика дает возможность оценивать деформацию волокон миокарда и ее скорость одновременно в продольном и радиальном направлениях. Поэтому данная методика получила название *2D-strain*. Согласно рекомендациям по проведению ЭхоКГ [2] нормальным значением деформации свободной стенки ПЖ следует считать величину $< -20\%$ ($-29,0 \pm 4,5\%$). В проведенных исследованиях было показано, что у пациентов с ЛГ, независимо от генеза этого заболевания, отмечалось достоверное снижение глобальной и региональной продольной деформации миокарда ПЖ [24].

Характер нарушений диастолической функции ПЖ при различных патологиях продолжает изучаться. Применение импульсного и тканевого режимов исследования позволяет выявить диастолическую дисфункцию ПЖ и определить ее характер. Выделяют следующие ее варианты: нарушение релаксации, а дисфункцию псевдонормального и рестриктивного типа.

Поскольку изменение показателей ЭхоКГ, характеризующих систолическую функцию ПЖ, как правило, свидетельствует о его декомпенсации, то актуальным является определение параметров, которые могли бы как можно раньше указывать на развитие нарушений компенсаторных возможностей ПЖ. С этой целью *M. Guazzi et al.* [25] предложили оценивать соответствие функции ПЖ состоянию легочного кровотока (то есть возросшей постнагрузке), используя отношение TAPSE к величине систолического давления в ЛА (TAPSE/СДЛА). В многочисленных исследованиях продемонстрирована хорошая прогностическая способность данного показателя в оценке прогноза летальности больных с ЛГ.

С помощью ЭхоКГ можно рассчитать систолическое, диастолическое и среднее давление в ЛА. В практике наиболее часто рассчитывают СДЛА. Следует подчеркнуть, что доплер-ЭхоКГ не является методом прямого измерения давления в ЛА, а позволяет лишь произвести его расчетную оценку на основе уравнения Бернулли и скорости транскуспидальной регургитации, что основано на множестве теоретических допущений. Точность оценки СДЛА зависит от ряда объективных и субъективных причин. При использовании результатов ЭхоКГ как единственного обоснования существует риск как ложноположительного, так и ложноотрицательного диагноза ЛГ.

На сегодняшний день при диагностике ЛГ принято использовать комплексный анализ эхокардиографических признаков, который включает в себя не только скорость потока ТР, но и взаимоотношение ПЖ и ЛЖ, структурные изменения ЛА, гемодинамические характеристики кровотока в ЛА и выраженность легочной регургитации, состояние нижней полой вены и ее реакции на дыхательные маневры, величину ПП, а также выраженность снижения TAPSE/СДЛА. Проведенный метаанализ показал, что такой комплексный подход при диагностике ЛГ позволяет повысить точность диагностического процесса, при этом чувствительность составляет 85%, а специфичность — 74% [26].

Несмотря на определенные диагностические ограничения данного метода, согласно современным рекомендациям по диагностике и лечению ЛГ [10], эхокардиография рекомендуется в качестве обязательного неинвазивного диагностического исследования первой линии у больных с подозрением на ЛГ.

УЗИ легких и плевральных полостей

В настоящее время в пульмонологической практике помимо традиционных методов исследования легких все чаще используется УЗИ грудной клетки с целью выявления патологии плевры и легкого.

УЗ-метод является быстрым, доступным и легко воспроизводимым способом [27–29]. Ультразвук уже давно показал свою информативность при обследовании сердца, печени, селезенки, почек и т. д. Учитывая физические свойства ультразвука и его рассеивание в воздушной среде, длительное время он не использовался для диагностики поражений легких [30]. В последнее время издано много работ по этой теме и показано, что при патологических процессах (отек, консолидация и т.д.) содержание воздуха в альвеолах уменьшается и создается необходимое акустическое сопротивление, позволяющее отражать УЗ-лучи [31–33]. Последние формируют изображение на УЗ-аппарате. УЗИ легких занимает около 3 мин [6] и может выполняться многократно, так как не несет лучевой нагрузки.

Техника проведения ультразвукового сканирования

УЗИ легких можно выполнять в любом положении тела. Все определяется показаниями при проведении исследования [6, 30]. Существуют быстрые техники сканирования при urgentных ситуациях, где используются разные протоколы УЗИ [6, 34–40]. В ряде случаев применяется полный протокол исследования легких [32].

Urgentные техники во многом дублируют друг друга. Для быстрого исследования легких сканируют 2–3 межреберных промежутка с каждой стороны — например, по BLUE-протоколу [6].

В международных рекомендациях по УЗИ легких предложено делить грудную клетку на 8 регионов [41]: верхний и нижний на передней поверхности грудной клетки, а также верхний и нижний регионы

латеральной поверхности грудной клетки с каждой стороны. Рекомендовано сканировать 28 межреберных промежутков для полной количественной оценки патологического процесса, в экстренных ситуациях разрешается ограничиться 2 регионами на передней поверхности [41]. Во время исследования датчик устанавливают перпендикулярно грудной клетке в межреберном промежутке [6, 32, 42]. Метка датчика располагается по направлению к голове, краниально.

Ультразвуковое изображение легких в норме

При ультразвуковом исследовании здоровых легких визуализируются: кожа, мягкие ткани, ребра, париетальный и висцеральный листки плевры. Далее ультразвуковой луч рассеивается и на экране формируется А-линия — гиперэхогенная горизонтальная линия (их может быть несколько). Она находится глубоко под плеврой, параллельно ей. А-линии могут присутствовать как в норме, так и при патологии и представляют собой реверберации от кожи и париетальной плевры [6, 32, 42].

Если на мониторе при УЗИ легких появляется какое-либо изображение, то это связано с патологией, поскольку легкое теряет воздушность.

При УЗИ легких можно лоцировать париетальную и висцеральную плевру. Плевра в норме представляется собой тонкую ровную линию. Ребра с плевральной линией между ними формируют ультразвуковую картину, называемую признаком «летучей мыши» (англ. *bat sign*), где ребра — «крылья», а плевральная линия между ними — «тело» [6, 42]. Для выявления данного признака необходимо разместить датчик вертикально в межреберном промежутке. Плевральная линия или плевра лоцируется в виде гиперэхогенной линии, расположенной сразу под ребрами и соответствует поверхности легких. Отсутствие признака «летучей мыши» при УЗИ свидетельствует о пневмотораксе [6, 42].

Скольжение легкого (англ. *lung sliding*) — это ритмичное, синхронное с дыханием движение висцеральной плевры, которое считается важным признаком сохраненной функциональной активности легких. Для определения данного феномена предпочтителен М-режим. При скольжении легкого наблюдается характерный признак «морского берега». Скольжение легкого становится неопределенным при эмфиземе легких, исчезает при пневмотораксе, ателектазе, плевральном фиброзе и апноэ [6, 32, 42].

В норме можно увидеть единичные В-линии — гиперэхогенные линейные вертикальные «лучи» [6, 42]. В реальном масштабе времени они движутся синхронно со «скольжением легкого». Считается нормальным, если их не более 3 в одном межреберном промежутке [6, 32, 42]. Также встречаются отдельные (изолированные) В-линии. При сканировании грудной клетки они обычно располагаются в нижних отделах боковой области [6, 29].

Ультразвуковое изображение легких при патологии

Интерстициальный синдром

Интерстициальный синдром возникает при кардиогенном отеке легких, остром респираторном дистресс-синдроме (ОРДС), интерстициальной пневмонии (вирусной [43–45]), хронических интерстициальных заболеваниях легких в стадии обострения [28, 44–49].

При интерстициальном синдроме происходит утолщение межальвеолярных перегородок. Создаются условия для отражения УЗ-сигнала в связи с образованием границ раздела между средами с различной акустической плотностью [1, 50]. При этом УЗ-сигнал не рассеивается в воздушной среде, а много раз отражается от утолщенных межальвеолярных перегородок. На экране монитора формируется артефакт в виде вертикальной линии, похожей на луч, который начинается от плевры и продолжается до конца экрана. Этот артефакт получил название В-линия, или «хвост кометы» [28, 31, 33].

Альвеолярная консолидация

Консолидация (утрата воздушности) легких может быть обусловлена пневмонией, ТЭЛА, новообразованием с метастазами, ателектазом легкого, коллапсом или контузией легкого [27, 51]. Консолидация появляется в результате заполнения жидкостью альвеол, от которых отражается УЗ-сигнал. При этом вместо обычного воздушного барьера наблюдаются эхоструктуры, напоминающие печеночную паренхиму. Верхней границей при отсутствии выпота является висцеральная плевра. Дистальная граница может быть «рваной» (стык между консолидированной и воздушной паренхимой легкого), такой феномен называют «тканевым знаком» (англ. *tissue-like sign*) [32, 51].

Об альвеолярной консолидации также может свидетельствовать воздушная бронхограмма, которая представляет собой множество точек или линейных гиперэхогенных затемнений, обнаруживаемых в области консолидации [6]. Бронхограмма бывает динамичной и статичной. Динамичная бронхограмма — результат движения воздуха от крупных бронхов к периферическим во время вдоха, что проявляется исчезновением гиперэхогенных затемнений во время дыхания. Если во время дыхания гиперэхогенные затемнения не исчезают, такая бронхограмма называется статичной [6, 51]. Динамичная воздушная бронхограмма чаще является признаком пневмонии. При статичной бронхограмме отсутствует движение воздуха в бронхах. Консолидация может быть как с бронхограммой, так и без нее, и редко располагается на передней поверхности грудной клетки — чаще всего такая локализация соответствует ателектазу [52].

Консолидация может включать дополнительные УЗ-признаки: признак «хвост кометы», плевральный выпот.

Альвеолярно-интерстициальный синдром

Альвеолярно-интерстициальный синдром сочетает в себе несколько ультразвуковых признаков и возникает при различных заболеваниях: пневмонии различной этиологии [48], ТЭЛА, новообразованиях с метастазами, ателектазе, коллапсе, контузии легкого [41]. УЗ-признаками альвеолярно-интерстициального синдрома являются консолидация с бронхограммой в сочетании с В-линиями [6]. Если имеются А-линии, то В-линии располагаются поверх них [6]. Еще одним признаком альвеолярно-интерстициального синдрома являются множественные В-линии [45], которые могут расширяться и сливаться между собой (сливные В-линии — *confluent B-lines*) [44].

При УЗИ полезна совместная оценка В-линий и характеристик плевральной линии. Гладкая, тонкая и ровная плевральная линия в совокупности с множественными В-линиями может свидетельствовать о кардиогенном отеке легких, в то время как при легочном генезе данного синдрома она чаще будет утолщенной, шероховатой, неровной [39].

Сочетание ЭхоКГ и УЗ-доплерографии вен нижних конечностей при ультразвуковых признаках поражения легких позволяет помочь в дифференциальной диагностике между кардиогенным и некардиогенным отеком легких, ТЭЛА [6, 46–49].

Распространению УЗИ легких в повседневной клинической практике способствуют простота выполнения исследования, информативность метода, возможность проведения непосредственно у постели больного, доступность оборудования.

Ультразвуковая диагностика наличия жидкости в плевральных полостях

Специалист, проводящий УЗИ грудной клетки, должен установить факт наличия жидкости в плевральной полости, определить ее локализацию и примерный объем выпота, по возможности определить этиологию плеврального выпота, оценить состояние легочной ткани, плевральных листков, а также мягких тканей грудной стенки, произвести разметку для проведения плевральной пункции.

Плевральный выпот представлен как анэхогенное пространство между париетальной и висцеральной плеврой [41]. В М-режиме он выглядит как знак синусоиды.

При УЗИ следует отличать выпот в перикарде от плеврального выпота. При перикардите выпот расположен впереди от нисходящей аорты при исследовании из парастернальной позиции по длинной оси.

Преимущество УЗ-метода — широкая доступность имеющегося аппаратного оснащения больниц. Исследование может выполняться на любых УЗ приборах без применения специального программного обеспечения [53]. Дополнительное преимущество заключается в том, что пациент может проходить обследование в любом положении — лежа, сидя или стоя. При наличии портативного УЗ сканера исследу-

дование может быть выполнено на месте, у постели больного.

Существует несколько причин, при которых невозможно получить информативное УЗ-изображение. Наличие слоя воздуха в мягких тканях грудной стенки при подкожной и межмышечной эмфиземе, развитие пневмоторакса вызывает полное отражение ультразвуковых волн. В этой ситуации рентгенологические методы являются более информативными и позволяют оценить степень коллабирования легкого, распространенность воздуха в плевральной полости.

В методологии УЗИ грудной клетки существуют 2 подхода: поисковый и прицельный режим сканирования. Более экономичным является прицельное УЗ сканирование после проведения рентгенографии грудной клетки в 2 проекциях.

Среди причин появления жидкости в плевральной полости можно выделить следующие: воспалительные изменения, опухолевое поражение, нарушение целостности плевральных листков, нарушение крово- и лимфообращения, а также снижение коллоидно-осмотического давления плазмы крови.

Плевральные выпоты, в зависимости от биохимического и цитологического состава плевральной жидкости, а также патогенеза ее образования, разделяются на трансудат и экссудат. Накопление трансудата в плевральной полости обозначается как гидроторакс. **Гидроторакс** образуется, когда количество продуцируемой плевральной жидкости превышает количество выводимой. Такая патологическая ситуация возникает при застойной сердечной недостаточности, циррозе печени, нефротическом синдроме.

При гидротораксе содержимое плевральной полости, как правило, однородное, полной акустической прозрачности (анэхогенное), не имеет никаких включений и свободно распределено в плевральной полости. Плевральные листки не изменены.

Экссудат отличается от трансудата большей относительной плотностью ($> 1,018$), высоким содержанием белка (> 30 г/л). **Экссудативный плеврит** наиболее часто возникает при распространении инфекционного воспалительного процесса в легких на плевру, а также может наблюдаться при метастатическом поражении плевры, злокачественных опухолях легких.

При серозном экссудате или на ранних стадиях развития серозно-фибринозного экссудата до образования фибриновых структур содержимое плевральной полости может иметь достаточно однородную анэхогенную структуру без изменения листков плевры. Поскольку экссудат характеризуется высоким содержанием белка, то в дальнейшем отмечается выпадение фибрина в осадок с образованием наложений на плевре различной толщины и распространенности, образование фибриновых тяжей и нитей, взвеси. При организации выпота фибриновые наложения на плевральных листках организуются

в плотную соединительную ткань с образованием плевральных шварт [53].

Эмпиема плевры или **пиоторакс** является результатом неблагоприятного варианта течения экссудативного плеврита. Пиоторакс характеризуется наличием содержимого достаточно густой консистенции, то есть содержимое имеет высокую акустическую плотность (по акустическим свойствам аналогично акустической плотности нормальной печени или превышает ее), и малой подвижностью. При неблагоприятном течении пиоторакса возможен переход патологического процесса на ткани грудной стенки с образованием подкожного абсцесса или с развитием бронхоплеврального свища.

При отсутствии данных за наличие первичной патологии органов, которые могли бы быть причиной трансудата, и при обнаружении жидкости в обеих плевральных полостях и в полости перикарда, следует исключать экссудативный характер жидкости, в первую очередь метастатической этиологии. С этой целью проводится исследование плевральных листков для выявления опухолевого поражения плевры (метастазов на плевре или первичного опухолевого поражения), причем данное исследование следует проводить до плевральной пункции, поскольку большое количество жидкостного содержимого является хорошим ультразвуковым окном. Утолщение плевральных листков или изоэхогенные узловые образования различной формы могут выявляться при карциноматозе плевры [54]. При злокачественной мезотелиоме плевральные листки могут иметь нерегулярные гипозоногенные утолщения с нечеткими границами. Для обнаружения плевральных метастазов рентгенография грудной клетки не информативна.

Кроме перечисленных выше вариантов содержимого плевральной полости возможно скопление крови (**гемоторакс**) или лимфы (**хилоторакс**). При геморрагическом характере выпота изменяется его эхоструктура, которая характеризуется появлением плотной мелкозернистой однородной взвеси, умеренно подвижной при дыхании. Кроме того, выявляются тромботические массы, УЗ-картина которых может быть схожа с изображением фибриновых структур при фибринозном плеврите. В данном случае принципиальной для дифференциальной диагностики является травма в анамнезе.

Различают свободные и осумкованные плевральные выпоты. При свободном выпоте жидкость может свободно перемещаться в любой отдел при перемене положения тела, поскольку жидкость не ограничена дополнительными структурами в плевральной полости, например фибринозными перегородками, швартами или плевральными сращениями. Осумкование характеризуется ограничением жидкости в определенной области и невозможностью или затруднением ее перемещения за счет наличия плотных фиброзных структур. Осумкование может быть полным или частичным. Наибольшей склонностью к осумкованию обладает гнойный экссудат.

Следует отметить, что УЗ метод не всегда позволяет визуализировать осумкованные плевриты. При сохранении нормальной воздушности прилежащего отдела легкого визуализация парамедиастинальных и междолевых плевритов невозможна [54].

Учитывая радиологическую безопасность, УЗИ плевральной полости является важным инструментом динамического наблюдения выявленных патологических изменений.

Использование УЗ-метода при проведении инвазивных процедур повышает их безопасность и результативность. Показано, что плевроцентез под контролем УЗ-сканирования позволяет получить жидкость в 80–90% ранее безуспешных процедур, проведенных «вслепую» [55], и снизить частоту ятрогенного пневмоторакса до 0–5% [56–61].

Определение объема плеврального выпота

Наиболее простой способ количественной оценки величины плеврального содержимого это определить расхождение плевральных листков, то есть толщину паракостального (наибольшее расстояние между костальной поверхностью воздушного легкого и грудной стенкой) или субпульмонального слоя жидкости (наибольшее расстояние между базальной поверхностью легкого и диафрагмой) [53]. На наш взгляд, этот способ наиболее прост, менее субъективен, достаточно высоковоспроизводим, поэтому может применяться при динамическом наблюдении, причем как в одном, так в разных лечебных учреждениях.

Используют разные формулы расчета для определения объема плеврального выпота [62–65]. Однако следует сказать, что все эти способы дают приблизительную количественную оценку с достаточной величиной ошибки, поскольку свободный плевральный выпот может иметь сложную геометрическую форму, с наличием большого количества разнообразных по величине и форме плотных структур. Кроме того, данный подход не лишен высокой доли субъективизма и нуждается в высококвалифицированном персонале. Из наиболее простых формул можно привести следующую: *объем выпота (мл) = 20 × расхождение листков плевры (мм)* [48, 62].

При правильной геометрической форме осумкованного выпота применение формулы для расчета объема эллипса дает возможность получить достаточно точное определение его объема.

Третий подход к определению количества свободного выпота в плевральной полости – это эмпирический метод оценки, основанный на последовательности изменения эхокартины выпота в зависимости от его объема [53]. Так обнаружение минимального количества свободной жидкости в заднем реберно-диафрагмальном синусе возможно при объеме около 5–10 мл, форма выпота треугольная. По мере увеличения количества жидкости меняется площадь выпота, а затем и его форма, взаимоотношение жидкости и легочной ткани. При плевральных вы-

потах > 500 мл появляется компрессионный ателектаз нижнего края легкого. Зная последовательность ультразвуковых изменений, исследователь может дать приблизительную оценку диапазона значений объема выпота. Данный метод достаточно субъективен, и во многом результат исследования зависит от опыта врача.

Ультразвуковая диагностика пневмоторакса

Для выявления признаков пневмоторакса УЗИ является более информативным методом по сравнению с рентгенографией легких, особенно если она выполнена в положении больного лежа [67]. Однако следует помнить, что у пациентов с ХОБЛ специфичность УЗИ при диагностике пневмоторакса снижается до 71%, что, вероятно, связано с гипервоздушностью и буллезными изменениями легочной ткани [67]. Успешное разрешение пневмоторакса может быть оценено с помощью УЗИ, причем УЗ-метод может определить остаточный пневмоторакс лучше, чем рентгенография органов грудной клетки [68].

Для диагностики пневмоторакса применяют 4 признака: наличие «точки легкого», отсутствие «скольжения легкого», отсутствие В-линий, отсутствие пульсации легкого [41, 63].

«Точка легкого» при сканировании в В-режиме визуализируется как граница между тканью легкого и пневмотораксом. В норме «точки легкого» не бывает [51, 63]. Признак «точка легкого» специфичен для пневмоторакса [27, 41].

Отсутствие «скольжения легкого» не всегда характеризует пневмоторакс. Например, при обструкции дыхательных путей опухолью, инородным телом или [69] при ОРДС, пневмонии, эмфиземе легких, при сращении плевры может отсутствовать скольжение легкого [27].

В М-режиме при пневмотораксе отсутствует такой признак, как «берег моря». Визуализируются горизонтальные линии – знак «стратосферы» или «штрих-код» [32, 41].

При наличии А-линий и отсутствии скольжения легкого или В-линий специфичность диагностики пневмоторакса возрастает до 96%. Напротив, в случае комбинации А-линий со скольжением легких и/или В-линиями пневмоторакс исключен [6, 32].

Диагностика пневмоторакса с помощью УЗИ является наиболее сложной задачей для начинающих специалистов и требует наработки практических навыков [6, 28, 41].

Ограничения в использовании УЗИ легких

Ограничения обусловлены, прежде всего, свойствами ультразвука. Невозможно получить данные о состоянии легочной ткани при подкожной эмфиземе, так как УЗ-лучи рассеиваются и не доходят до легкого. Похожая ситуация возникает при исследовании больных с эмфиземой легких, у пациентов, которым проводится искусственная вентиляция легких (ИВЛ) с высоким положительным давлением

в конце выдоха. Трудности возникают при обследовании тучных пациентов. Усложняет исследование и наличие повязок на грудной клетке. Учитывая, что УЗ-синдромы характеризуют большое количество патологий, установить точный диагноз не удастся [48, 50].

Результаты УЗИ легких во многом зависят от умения оператора. Для быстрого и правильного выполнения исследования, грамотной интерпретации результатов необходимы знания и практические навыки. Однако следует отметить, что можно освоить методику УЗИ легких в достаточно короткий временной промежуток. Так, было показано, что после 12 исследований, проведенных совместно со специалистом, при дальнейшей самостоятельной работе обучающийся в 98% случаев, как правило, не допускает серьезных ошибок [70].

Несмотря на некоторые ограничения УЗИ легких, связанные с физикой ультразвука [1, 50], данный метод является эффективным при многих патологических состояниях легких.

УЗИ диафрагмы

Одной из актуальных проблем пульмонологии является анализ состояния основной дыхательной мышцы — диафрагмы. Состояние диафрагмы имеет важное значение не только у больных с респираторными, но и нейромышечными заболеваниями, а также при «неясной» одышке и верификации причин дыхательной недостаточности, при решении вопроса об отключении пациентов от ИВЛ. С этой задачей вполне успешно может справиться УЗИ, которое является неинвазивным и безопасным методом диагностики, позволяющим получить важную информацию как о структуре, так и о функции диафрагмы. Данная методика проста, хорошо воспроизводима и может использоваться как в диагностическом процессе, так и при динамическом наблюдении.

Оценка морфо-функционального состояния диафрагмы основана на определении экскурсии и утолщения диафрагмы при дыхательных маневрах. Для исследования экскурсии диафрагмы используют низкочастотный УЗ датчик (2,5–5 МГц) [71]. При исследовании правого купола диафрагмы печень служит акустическим окном, а движение диафрагмы определяется по перемещению гиперэхогенной линии, которая примыкает к печени. При исследовании левого купола диафрагмы в качестве ультразвукового окна используют изображение селезенки. Как и при эхокардиографии, для анализа движения диафрагмы может быть применена оценка скорости этого движения и методика *Speckle Tracking* [72–75].

Для оценки толщины диафрагмы используется высокочастотный датчик (7–15 МГц), с помощью которого визуализируют диафрагму в месте ее соприкосновения с латеральной грудной стенкой (зона аппозиции) [76]. Диафрагма определяется в виде гипозоногенной структуры выше изображения печени или селезенки, ограниченной 2 тонкими гипер-

эхогенными линиями, которые соответствуют диафрагмальной плевре (верхняя) и брюшине (нижняя линия) [76]. Утолщение диафрагмы при дыхании может быть измерено в М- и В-режимах. Исследование выполняют как при спокойном дыхании, так и при дыхательных маневрах (глубокий вдох, *sniff*-маневр). Показано, что повторные измерения параметров диафрагмы при УЗИ проводятся с достаточно низкой вариабельностью как одним, так и разными исследователями [76].

В норме при спокойном вдохе диафрагма движется в каудальном направлении, при этом амплитуда движения превосходит 10–15 мм. При дисфункции диафрагмы амплитуда сокращается до < 5 мм; кроме того, может регистрироваться парадоксальное движение диафрагмы в краниальном направлении.

R. Carrillo-Esper et al. показали, что нормальное значение толщины диафрагмы на уровне функциональной остаточной емкости легких должно превышать 1,3–1,5 мм для женщин и 1,7–2,0 мм для мужчин (> 1,5–1,7 мм для общей когорты) [77]. *A. G. Boon et al.* определили нижнюю границу нормального значения этого показателя (как 5-й перцентиль), которая составила 1,5 мм [78].

В норме при максимально глубоком вдохе толщина диафрагмы должна увеличиваться не менее чем на 20% от значения на выдохе, причем разница между измерениями, выполненными справа и слева, должна быть минимальной [78].

Таким образом, данный метод при соблюдении правил проведения исследования позволяет достаточно просто получить точную и важную клиническую информацию. Например, были получены убедительные данные, которые продемонстрировали, что удачная экстубация имеет высокую вероятность при экскурсии диафрагмы > 10,5 мм и при фракции утолщения > 30–36% [79, 80]. Снижение экскурсии диафрагмы при максимальном усилии на вдохе < 25 мм с чувствительностью 100% и специфичностью 85% свидетельствует о тяжелой дисфункции [81].

При парезе диафрагмы ее толщина при глубоком вдохе от уровня функциональной остаточной емкости легких до общей емкости легких (фракция утолщения диафрагмы) должна увеличиваться не менее чем на 20% [78, 82]. Если использовать комбинацию двух УЗ признаков, а именно снижение фракции утолщения диафрагмы при дыхательном маневре < 20% и уменьшение толщины < 1,4 мм при спокойном выдохе (на уровне функциональной остаточной емкости легких), то при диагностике нейромышечного пареза диафрагмы чувствительность и специфичность метода составляют 93 и 100% соответственно [83].

УЗИ диафрагмы при острой дыхательной недостаточности (ОДН) также имеет несомненную клиническую важность. Так, *X. Bobbia B et al.* показали, что у больных с экскурсией диафрагмы > 2,3 см, измеренной в М-режиме, не требовалась неинвазивная вентиляция легких (НВЛ), в то время как при экскурсии диафрагмы < 2 см потребность в НВЛ значимо

возрастала [84]. Результаты исследования *F. Antenora et al.* свидетельствуют, что $\frac{1}{3}$ пациентов, которым требовалась НВЛ, имели фракцию утолщения диафрагмы $< 20\%$ [85]. *A. Marchioni et al.* обнаружили, что у пациентов с обострением ХОБЛ при наличии дисфункции диафрагмы более чем в 4 раза возрастает риск неудачной НВЛ, а такой УЗ-параметр, как фракция утолщения диафрагмы, продемонстрировал большую точность в предсказании неблагоприятного результата НВЛ при ОДН, чем исходные значения $pH < 7,25$ или изменения pH и парциального напряжения углекислого газа в артериальной крови в первые 2 ч после начала НВЛ, с помощью которых традиционно оценивают эффективность неинвазивной вентиляции [86]. Признаки дисфункции диафрагмы коррелируют с вероятностью летального исхода, длительностью пребывания в отделении интенсивной терапии, необходимостью проведения длительной механической вентиляции легких.

Дополнительные возможности УЗИ при различных заболеваниях легких

Применение УЗ-методов в пульмонологии имеет широкие и разнообразные аспекты. Например, оценка распространенности патологического процесса при опухолях, ЛАМ, саркоидозе и т. д. Так в клинической практике при саркоидозе легких часто необходима информация о состоянии периферических лимфатических узлов. С помощью УЗИ можно как выявить увеличение отдельных групп лимфоузлов, так и оценить их структуру. В норме лимфатический узел при УЗИ выглядит как овальной формы образование с четкими ровными контурами, гипоехогенной краевой частью и гиперэхогенной сердцевиной, размером не более 10 мм. Выявление увеличенных лимфоузлов округлой формы, гипоехогенной структуры без гиперэхогенной срединной части свидетельствует о генерализации процесса, а уменьшение их размеров в процессе лечения и нормализация структуры — о положительной динамике.

У больных с ЛАМ с помощью УЗИ органов брюшной полости и почек можно выявить гемангиомы печени и ангиомиолипомы почек, что для врача-пульмонолога является дополнительной информацией, подтверждающей диагноз ЛАМ. У женщин с диагнозом ЛАМ необходимо проведение УЗИ органов малого таза, для исключения наличия дополнительных образований в малом тазу.

При раке легкого рекомендуется проведение УЗИ печени для выявления очагового поражения печени, что свидетельствует о генерализации процесса.

Заключение

Таким образом, широкий арсенал имеющихся на сегодняшний день различных методов УЗИ помогает врачу-пульмонологу правильно построить дальнейший диагностический процесс, выбрать правильную тактику лечения или скорректировать ее. Методы ультразвуковой диагностики, с учетом их

безопасности и доступности, неопределимы при динамическом наблюдении и могут быть многократно повторены. УЗИ легких в ряде случаев служит разумной альтернативой рентгенологическому исследованию. Следует не противопоставлять эти направления в исследовании, а оптимально сочетать их для повышения качества и безопасности диагностики. Необходимо понимать, что лишь комплексный подход, грамотный анализ полученных клинических, лабораторных и инструментальных данных позволяет врачу выстроить диагностический процесс и проводить динамическое наблюдение за пациентом наиболее оптимальным образом.

Литература

1. Практическое руководство по ультразвуковой диагностике. Общая ультразвуковая диагностика / Под ред. В.В. Митькова. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Издательский дом Видар-М, 2019. 756 с.
2. Lang RM, Badano LP, Mor-Avi V. et al. Recommendations for cardiac chamber quantification by echocardiography in adults: an update from the American Society of Echocardiography and the European Association of Cardiovascular Imaging. *J Am Soc Echocardiogr.* 2015; 28(1): 1-39.e14. doi: 10.1016/j.echo.2014.10.003.
3. Никифоров В.С., Никищенко Ю.В. Современные возможности speckle tracking эхокардиографии в клинической практике. *Рациональная Фармакотерапия в кардиологии* 2017; 13(2): 248-255. doi: 10.20996/1819-6446-2017-13-2-248-255.
4. Alerhand S., Graumann O., Nelson B.P. Physics and basic principles. In: Laursen C.B., Rahman N.M., Volpicelli G., eds. *Thoracic ultrasound*. Sheffield: European Respiratory Society; 2018: 1–13. DOI: 10.1183/2312508X.10006017.
5. Radzina M., Biederer J. Ultrasonography of the lung. *RoFo.* 2019; 191 (10): 909–923. doi: 10.1055/a-0881-3179.
6. Lichtenstein D.A., Meziere G.A. Relevance of lung ultrasound in the diagnosis of acute respiratory failure: the BLUE protocol. *Chest.* 2008; 134 (1): 117–125. doi: 10.1378/chest.07-2800.
7. Gargani L., Volpicelli G. How I do it: Lung ultrasound. *Cardiovasc. Ultrasound.* 2014; 12: 25. doi: 10.1186/1476-7120-12-25.
8. Mojoli F., Bouhemad D., Mongodi S. et al. Lung ultrasound for critically ill patients. *Am. J. Respir. Crit. Care Med.* 2019; 199 (6): 701–714. doi: 10.1164/rccm.201802-0236CI.
9. Авдеев С.Н. Легочная гипертензия при хронических респираторных заболеваниях. *Практическая пульмонология* 2010, 2: 1-10.
10. Humbert M, Kovacs G, Hoeper MM, et al.; ESC/ERS Scientific Document Group. 2022 ESC/ERS Guidelines for the diagnosis and treatment of pulmonary hypertension. *Eur Heart J.* 2022 Oct 11; 43(38): 3618-3731. doi: 10.1093/eurheartj/ehac237.
11. Santamore WP, Dell'Italia LJ. Ventricular interdependence: significant left ventricular contributions to

right ventricular systolic function. *Prog Cardiovasc Dis.* 1998; 40: 289–308. doi: 10.1016/s0033-0620(98)80049-2.

12. Ryan JJ, Huston J, Kutty S, et al. Right ventricular adaptation and failure in pulmonary arterial hypertension. *Can J Cardiol.* 2015; 31: 391–406. doi: 10.1016/j.cjca.2015.01.023.

13. Konstam MA, Cohen SR, Salem DN, et al. Comparison of left and right ventricular end-systolic pressure-volume relations in congestive heart failure. *J Am Coll Cardiol.* 1985; 5: 1326–1334. doi: 10.1016/s0735-1097(85)80344-2.

14. Triulizi M., Gillam L.D., Gentile F. et al. Normal adult cross-sectional echocardiographic values: linear dimensions and chamber areas echocardiography. *Echo-cardiography* 1984; 1: 403-426. doi:10.1111/j.1540-8175.1984.tb00173.x

15. Müller H, Noble S, Keller PF, et al. Biatrial anatomical reverse remodelling after radiofrequency catheter ablation for atrial fibrillation: evidence from real-time three-dimensional echocardiography. *Europace* 2008; 10(9): 1073-1078. doi: 10.1093/europace/eun187.

16. Nagueh SF, Mikati I, Kopelen HA, et al. Doppler estimation of left ventricular filling pressure in sinus tachycardia. A new application of tissue doppler imaging. *Circulation* 1998; 98(16): 1644-50. doi: 10.1161/01.cir.98.16.1644.

17. Kaul S, Tei C, Hopkins JM, Shah PM. Assessment of right ventricular function using two-dimensional echocardiography. *Am Heart J.* 1984; 107(3): 526-31. doi: 10.1016/0002-8703(84)90095-4.

18. López-Candales A, Dohi K, Rajagopalan N, et al. Defining normal variables of right ventricular size and function in pulmonary hypertension: an echocardiographic study. *Postgrad Med J.* 2008; 84(987): 40-45. doi: 10.1136/pgmj.2007.059642.

19. Miller D, Farah MG, Liner A, et al. The relation between quantitative right ventricular ejection fraction and indices of tricuspid annular motion and myocardial performance. *J Am Soc Echocardiogr.* 2004; 17(5): 443-447. doi: 10.1016/j.echo.2004.01.010.

20. Hsiao SH, Lin SK, Wang WC, et al. Severe tricuspid regurgitation shows significant impact in the relationship among peak systolic tricuspid annular velocity, tricuspid annular plane systolic excursion, and right ventricular ejection fraction. *J Am Soc Echocardiogr.* 2006; 19(7): 902-10. doi: 10.1016/j.echo.2006.01.014.

21. Howard LS, Grapsa J, Dawson D, et al. Echocardiographic assessment of pulmonary hypertension: standard operating procedure. *Eur Respir Rev.* 2012; 21(125): 239-48. doi: 10.1183/09059180.00003912.

22. Rudski L.G., Lai W.W., Afilalo J. et al. Guidelines for the echocardiographic assessment of the right heart in adults: a report from the American Society of Echocardiography endorsed by the European Association of Echocardiography, a registered branch of the European Society of Cardiology, and the Canadian Society of Echocardiography. *J Am Soc Echocardiogr.* 2010; 23(7): 685-713; quiz 786-8. doi: 10.1016/j.echo.2010.05.010.

23. Saxena N, Rajagopalan N, Edelman K, López-Candales A. Tricuspid annular systolic velocity: a useful measurement in determining right ventricular systolic function regardless of pulmonary artery pressures. *Echocardiography* 2006; 23(9): 750-755. doi: 10.1111/j.1540-8175.2006.00305.x.

24. Garcia L.I., Mingo S.V., Monivas I. et al. Evaluation of right ventricular function with two-dimensional strain in pulmonary hypertension. *Eur. Heart. J.* 2011; 32: 441.

25. Guazzi M, Bandera F, Pelissero G, et al. Tricuspid annular plane systolic excursion and pulmonary arterial systolic pressure relationship in heart failure: an index of right ventricular contractile function and prognosis. *Am J Physiol Heart Circ Physiol.* 2013; 305(9): H1373-81. doi: 10.1152/ajpheart.00157.2013.

26. Ni JR, Yan PJ, Liu SD, et al. Diagnostic accuracy of transthoracic echocardiography for pulmonary hypertension: a systematic review and meta-analysis. *BMJ Open.* 2019; 9(12): e033084. doi: 10.1136/bmjopen-2019-033084.

27. Khosla R. Lung Sonography. In: *Sonography* / Ed. K.Thoirs. 2012. 6–130. doi: 10.5772/27400.

28. Lichtenstein D. *General Ultrasound in the Critically ill.* New York, NY: Springer, 2004.

29. Lichtenstein D.A. Lung. In: Heilmann U. (ed). *General ultrasound in the critically ill.* Berlin: Springer 2005, 116-128.

30. Gargani L. Lung ultrasound: a new tool for the cardiologist. *Cardiovasc. Ultrasound.* 2011; 9: 6. doi: 10.1186/1476-7120-9-6.

31. Bouhemad B, Zhang M, Lu Q, Rouby JJ. Clinical review: Bedside lung ultrasound in critical care practice. *Critical Care* 2007, 11: 205. doi: 10.1186/cc5668.

32. Hakimisefat B, Mayo PH. Lung Ultrasonography. *The Open Critical Care Medicine Journal* 2010; 3: 21-25.

33. Lichtenstein D, Mézière G, Biderman P, et al. The Comet-tail Artifact. An Ultrasound Sign of Alveolar-Interstitial Syndrome. *Am J Respir Crit Care Med.* 1997; 156(5): 1640-1646. doi: 10.1164/ajrcm.156.5.96-07096.

34. Lanniello S, Conte P, Di Serafino M, et al. Diagnostic accuracy of pubic symphysis ultrasound in the detection of unstable pelvis in polytrauma patients during e-FAST: the value of FAST-PLUS protocol. A preliminary experience. *J Ultrasound.* 2021; 24(4): 423-428. doi: 10.1007/s40477-020-00483-6.

35. Lichtenstein D. FALLS-protocol: lung ultrasound in hemodynamic assessment of shock. *Heart Lung Vessel.* 2013; 5(3):142-147.

36. Labovitz AJ, Noble VE, Bierig M, et al. Focused cardiac ultrasound in the emergent setting: a consensus statement of the American Society of Echocardiography and American College of Emergency Physicians. *J Am Soc Echocardiogr.* 2010; 23(12): 1225-30. doi: 10.1016/j.echo.2010.10.005.

37. Rose JS, Bair AE, Mandavia D, Kinser DJ. The UHP ultrasound protocol: a novel ultrasound approach to the empiric evaluation of the undifferentiated hypotensive

- patient. *Am J Emerg Med.* 2001.; 19(4): 299-302. doi: 10.1053/ajem.2001.24481.
38. Seif D, Perera P, Mailhot T, et al. Bedside ultrasound in resuscitation and the rapid ultrasound in shock protocol. *Crit Care Res Pract.* 2012; 2012: 503254. doi: 10.1155/2012/503254.
39. Mantha KC, Berry B, Anderson T, et al. The PIC Protocol: A Novel Emergency Department Ultrasound Protocol for Patients Presenting With Dyspnea. *Annals of Emergency Medicine.* 2011; 58: 4S. doi: 10.1016/j.annemergmed.2011.06.183
40. Perera P, Mailhot T, Riley D, Mandavia D. The RUSH Exam 2012: Rapid Ultrasound in Shock in the Evaluation of the Critically Ill Patient. *Ultrasound Clin* 7 (2012) 255–278. doi:10.1016/j.cult.2011.12.010.
41. Volpicelli G, Elbarbary M, Blaivas M, et al. International evidence-based recommendations for point-of-care lung ultrasound. *Intensive Care Med.* 2012; 38(4): 577-91. doi: 10.1007/s00134-012-2513-4.
42. Lo Giudice V, Bruni A, Corcioni E, Corcioni B. Ultrasound in the evaluation of interstitial pneumonia. *J Ultrasound.* 2008; 11(1): 30-38. doi: 10.1016/j.jus.2007.10.002.
43. Gil-Rodríguez J, Pérez de Rojas J, Aranda-Laserina P, Benavente-Fernández A, Martos-Ruiz M, Peregrina-Rivas JA, Guirao-Arrabal E. Ultrasound findings of lung ultrasonography in COVID-19: A systematic review. *Eur J Radiol.* 2022; 148: 110156.
44. Tsung JW, Kessler DO, Shah VP. Prospective application of clinician-performed lung ultrasonography during the 2009 H1N1 influenza A pandemic: distinguishing viral from bacterial pneumonia. *Crit Ultrasound J.* 2012; 4(1): 16. doi: 10.1186/2036-7902-4-16.
45. Zhao Z., Jiang L., Xi X. et al. Prognostic value of extravascular lung water assessed with lung ultrasound score by chest sonography in patients with acute respiratory distress syndrome. *BMC Pulm Med.* 2015; 23 (15):98. doi: 10.1186/s12890-015-0091-2.
46. Гришин А.М., Громов С.Г., Радова Н.Ф. и др. Ультразвуковое исследование легких для выявления внесосудистой жидкости у больного инфарктом миокарда с острой левожелудочковой недостаточностью. *Кремлевская мед. Клин вестник.* 2010; 2: 55-57.
47. Гришин А.М., Алехин М.Н., Сидоренко Б.А. Опыт использования ультразвукового исследования для выявления внесосудистой жидкости в легких у больных с сердечной недостаточностью. *Терапевтический архив.* 2010; 4: 35-39.
48. Новиков В.А., Галстян Г.М., Гемджян Э.Г. и др. Ультразвуковое исследование легких и плевральных полостей при острой дыхательной недостаточности, вызванной пневмонией, у онкогематологических больных. *Анестезиология и реаниматология.* 2016; 61 (3): 183-189. doi: 10.18821/0201-7563-2016-3-183-189
49. Овсянникова О.Б., Ананьева Л.П., Конева О.А., и др. Ультразвуковое сканирование: возможности и перспективы для оценки поражения легких при системной склеродермии. *Научно-практическая ревматология.* 2012; 50 (6): 80–7.
50. Хофер М. Ультразвуковая диагностика. Базовый курс / Пер. с англ. под ред. к. м. н. В.А. Костюченко. М.: Медицинская литература, 2006.
51. Lichtenstein DA, Lascols N, Mezière G, Gepner A. Ultrasound diagnosis of alveolar consolidation in the critically ill. *Intensive Care Med.* 2004; 30(2): 276-281. doi: 10.1007/s00134-003-2075-6.
52. Галстян Г.М., Новиков В.А., Троицкая В.В. и др. Диагностика пневмонии с помощью ультразвукового исследования легких у беременных с опухолевыми заболеваниями системы крови. *Терапевтический архив* 2015; 1: 79-87. doi: 10.17116/terarkh2015871779-87.
53. Сафонов Д.В., Шахов Б.Е. Ультразвуковая диагностика плевральных выпотов. Учебное пособие. М.: ВИДАР, 2011.
54. Mathis G. Thoraxsonography. Part I: Chest wall and pleura. *Ultrasound Med Biol.* 1997; 23(8): 1131-39. doi: 10.1016/s0301-5629(97)00112-9.
55. Weingardt JP, Guico RR, Nemcek AA Jr, et al. Ultrasound findings following failed, clinically directed thoracenteses. *J Clin Ultrasound.* 1994; 22(7): 419-26. doi: 10.1002/jcu.1870220702.
56. Grogan DR, Irwin RS, Channick R, et al. Complications associated with thoracentesis. A prospective, randomized study comparing three different methods. *Arch Intern Med.* 1990; 150(4): 873-77. doi: 10.1001/archinte.150.4.873.
57. Colt HG, Brewer N, Barbur E. Evaluation of patient-related and procedure-related factors contributing to pneumothorax following thoracentesis. *Chest* 1999; 116(1):134-138. doi: 10.1378/chest.116.1.134.
58. Barnes TW, Morgenthaler TI, Olson EJ, et al. Sonographically guided thoracentesis and rate of pneumothorax. *J Clin Ultrasound* 2005; 33(9): 442-446. doi: 10.1002/jcu.20163.
59. Jones PW, Moyers JP, Rogers JT, et al. Ultrasound-guided thoracentesis: is it a safer method? *Chest* 2003; 123(2): 418-23. doi: 10.1378/chest.123.2.418.
60. Capizzi SA, Prakash UB. Chest roentgenography after outpatient thoracentesis. *Mayo Clin Proc.* 1998; 73(10): 948-50. doi: 10.4065/73.10.948.
61. Doyle JJ, Hnatiuk OW, Torrington KG, et al. Necessity of routine chest roentgenography after thoracentesis. *Ann. Intern. Med.* 1996; 124(9): 816-20. doi: 10.7326/0003-4819-124-9-199605010-00005.
62. Balik M, Plasil P, Waldauf P, et al. Ultrasound estimation of volume of pleural fluid in mechanically ventilated patients. *Intensive Care Med.* 2006; 32(2): 318-21. doi: 10.1007/s00134-005-0024-2.
63. Mayo PH, Doelken P. Pleural Ultrasonography. *Clin Chest Med.* 2006; 27(2): 215-27. doi: 10.1016/j.ccm.2006.01.003.
64. Rahman NM, Chapman SJ, Davies RJ. Pleural effusion: a structured approach to care. *Br Med Bull.* 2005; 72: 31-47. doi: 10.1093/bmb/ldh040.

65. Remérand F., Dellamonica J., Mao Z. et al. Multiphase ultrasound approach to quantify pleural effusion at the bedside. *Intensive Care Med.* 2010; 36(4): 656–64. doi: 10.1007/s00134-010-1769-9.
66. Wilkerson RG, Stone MB. Sensitivity of bedside ultrasound and supine anteroposterior chest radiographs for the identification of pneumothorax after blunt trauma. *Acad Emerg Med.* 2010; 17(1):11–17. doi: 10.1111/j.1553-2712.2009.00628.x.
67. Slater A, Goodwin M, Anderson KE, Gleeson FV. COPD can mimic the appearance of pneumothorax on thoracic ultrasound. *Chest* 2006; 129(3): 545–50. doi: 10.1378/chest.129.3.545.
68. Galbois A, Ait-Oufella H, Baudel JL, et al. Pleural ultrasound compared with chest radiographic detection of pneumothorax resolution after drainage. *Chest* 2010; 138(3): 648–55. doi: 10.1378/chest.09-2224.
69. Bouhemad B., Brisson H., Le-Guen M., et al. Bedside Ultrasound Assessment of Positive End-Expiratory Pressure–induced Lung Recruitment. *Am J Respir Crit Care Med.* 2011; 183: 341–347. doi: 10.1164/rccm.201003-0369OC.
70. See KC, Ong V, Wong SH, et al. Lung ultrasound training: curriculum implementation and learning trajectory among respiratory therapists. *Intensive Care Med.* 2016; 42(1): 63–71. doi: 10.1007/s00134-015-4102-9.
71. Papa GFS, Pellegrino GM, Di Marco F, et al. A Review of the Ultrasound Assessment of Diaphragmatic Function in Clinical Practice. *Respiration* 2016; 91: 403–11. doi: 10.1159/000446518.
72. Testa A, Soldati G, Giannuzzi R, et al. Ultrasound M-mode assessment of diaphragmatic kinetics by anterior transverse scanning in healthy subjects. *Ultrasound Med Biol.* 2011; 37: 44–52. doi: 10.1016/j.ultrasmedbio.2010.10.004.
73. Ye X, Xiao H, Bai W, et al. Two-dimensional strain ultrasound speckle tracking as a novel approach for the evaluation of right hemidiaphragmatic longitudinal deformation. *Exp Ther Med.* 2013; 6: 368–72. doi: 10.3892/etm.2013.1133.
74. Orde SR, Boon AJ, Firth DG, et al. Diaphragm assessment by two dimensional speckle tracking imaging in normal subjects. *BMC Anesthesiol.* 2016; 16: 43. doi: 10.1186/s12871-016-0201-6.
75. Goutman SA, Hamilton JD, Swihart B, et al. Speckle tracking as a method to measure hemidiaphragm excursion. *Muscle Nerve* 2017; 55: 125–127. doi: 10.1002/mus.25380.
76. Ferrari G, Skaarup SH, Panero F, Wrightson JM. The diaphragm. In: Laursen CB, Rahman NM, Volpicelli G, eds. *Thoracic Ultrasound (ERS Monograph)*. Sheffield, European Respiratory Society, 2018:129–147. doi: 10.1183/2312508X.10006917.
77. Carrillo-Esper R, Perez-Calatayud AA, Arch-Tirado E, et al. Standardization of sonographic diaphragm thickness evaluations in healthy volunteers. *Respir Care.* 2016; 61: 920–924. doi: 10.4187/respcare.03999.
78. Boon AJ, Harper CJ, Ghahfarokhi LS, et al. Two-dimensional ultrasound imaging of the diaphragm: quantitative values in normal subjects. *Muscle Nerve* 2013; 47: 884–889. doi: 10.1002/mus.23702.
79. DiNino E, Gartman EJ, Sethi JM, McCool FD. Diaphragm ultrasound as a predictor of successful extubation from mechanical ventilation. *Thorax* 2014; 69: 423–427. doi: 10.1136/thoraxjnl-2013-204111.
80. Ferrari G, De Filippi G, Elia F, et al. Diaphragm ultrasound as a new index of discontinuation from mechanical ventilation. *Crit Ultrasound J.* 2014; 6: 8. doi: 10.1186/2036-7902-6-8.
81. Lerolle N, Guerot E, Dimassi S, et al. Ultrasonographic diagnostic criterion for severe diaphragmatic dysfunction after cardiac surgery. *Chest.* 2009; 135: 401–407. doi: 10.1378/chest.08-1531.
82. Gottesman E, McCool FD. Ultrasound evaluation of the paralyzed diaphragm. *Am J Respir Crit Care Med.* 1997; 155: 1570–74. doi: 10.1164/ajrccm.155.5.9154859.
83. Boon AJ, Sekiguchi H, Harper CJ, et al. Sensitivity and specificity of diagnostic ultrasound in the diagnosis of phrenic neuropathy. *Neurology* 2014; 83: 1264–70. doi: 10.1212/WNL.0000000000000841.
84. Bobbia X, Clement A, Claret PG, et al. Diaphragmatic excursion measurement in emergency patients with acute dyspnea: toward a new diagnostic tool? *Am J Emerg Med.* 2016; 34: 1653–17. doi: 10.1016/j.ajem.2016.05.055.
85. Antenora F, Fantini R, Iattoni A, et al. Prevalence and outcomes of diaphragmatic dysfunction assessed by ultrasound technology during acute exacerbation of chronic obstructive pulmonary disease: a pilot study. *Respirology* 2017; 22(2): 338–44. doi: 10.1111/resp.12916.
86. Marchioni A, Castaniere I, Tonelli R, et al. Ultrasound assessed diaphragmatic impairment is a predictor of outcomes in patients with acute exacerbation of chronic obstructive pulmonary disease undergoing noninvasive ventilation. *Critical Care.* 2018; 22: 109. doi: 10.1186/s13054-018-2033-x.

Информация об авторах

Неклюдова Галина Васильевна — д. м. н., профессор кафедры пульмонологии ФГАОУ ВО «Первый Московский государственный медицинский университет имени И.М. Сеченова» Министерства здравоохранения РФ; ведущий научный сотрудник лаборатории функциональных и ультразвуковых методов исследования ФГБУ «НИИ пульмонологии» ФМБА; тел.: (495) 465-53-84; e-mail: nekludova_gala@mail.ru (ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9509-0867>)

Науменко Жанна Константиновна — к. м. н., доцент кафедры пульмонологии факультета дополнительного профессионального образования ФГАОУ ВО «Российский национальный исследовательский медицинский университет имени Н.И. Пирогова» Министерства здравоохранения РФ; старший научный сотрудник лаборатории функциональных и ультразвуковых методов исследования ФГБУ «НИИ пульмонологии» ФМБА; врач функциональной

диагностики отделения функциональной и ультразвуковой диагностики ГБУЗ «Городская клиническая больница имени Д.Д. Плетнева» Департамента здравоохранения Москвы; тел.: (903) 270-27-16; e-mail: naumenko_janna@mail.ru (ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4804-6142>)

Новиков Вячеслав Александрович — к. м. н., зав. отделением анестезиологии-реанимации с кабинетом общего обезболивания ФГБУ «Национальный медицинский исследовательский центр гематологии» Министерства здравоохранения РФ; e-mail: slashhd@mail.ru (ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8776-6724>)

Галстян Геннадий Мартинович — д. м. н., зав. отделением реанимации и интенсивной терапии ФГБУ «Национальный медицинский исследовательский центр гематологии» Министерства здравоохранения РФ; тел.: (945) 612-48-59; e-mail: gengalst@gmail.com (ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-8818-8949>)

Паровичникова Елена Николаевна — д. м. н., генеральный директор ФГБУ «Национальный медицинский исследовательский центр гематологии» Министерства здравоохранения РФ; главный внештатный специалист-гематолог Министерства здравоохранения РФ; тел.: (495) 612-21-23; e-mail: elenap@blood.ru (ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6177-3566>)