

# Ультразвуковое исследование функции диафрагмы: методика, нормативные значения

П.Г. Евграфов , Л.Т. Хамидова, С.С. Петриков

Отделение лучевой диагностики

ГБУЗ «Научно-исследовательский институт скорой помощи им. Н.В. Склифосовского ДЗМ»

129090, Российская Федерация, Москва, Большая Сухареvская пл., д. 3

 **Контактная информация:** Евграфов Павел Геннадьевич, младший научный сотрудник отделения лучевой диагностики ГБУЗ «НИИ СП им. Н.В. Склифосовского ДЗМ». Email: [gembov@gmail.com](mailto:gembov@gmail.com)

## АКТУАЛЬНОСТЬ

Дисфункция диафрагмы (ДД) широко распространена у пациентов, находящихся в критическом состоянии, и зачастую является причиной дыхательной недостаточности, требующей респираторной поддержки. Общепринятая методика неинвазивного динамического исследования функции диафрагмы до настоящего момента не предложена.

## ЦЕЛЬ

Разработать методику ультразвукового исследования подвижности и относительного утолщения диафрагмы, предложить нормативные показатели экскурсии и относительного утолщения диафрагмы в зависимости от пола и возраста.

## МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

У 81 здорового добровольца в возрасте от 25 до 84 лет (средний возраст  $55 \pm 15$  лет) при ультразвуковом исследовании определена толщина диафрагмы справа и слева у места прикрепления мышечной части на выдохе, спокойном и форсированном вдохе; рассчитана фракция утолщения (ФУ), экскурсия диафрагмы на спокойном и максимальном вдохе, а также индекс функционального резерва по утолщению (ИФР(т)) и экскурсии диафрагмы (ИФР(э)). Прослежена зависимость определяемых параметров от возраста, пола, роста, индекса массы тела (ИМТ) и площади поверхности тела (ППТ) испытуемых. Для оценки межисследовательской воспроизводимости рассчитаны пределы согласия и коэффициент внутриклассовой корреляции ультразвуковых параметров функции диафрагмы.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Экскурсия диафрагмы у женщин меньше, чем у мужчин, и статистически значимо уменьшается с возрастом. Продемонстрирована прямая зависимость между толщиной диафрагмы на выдохе и ППТ. ФУ на спокойном вдохе слева слабо, но статистически значимо падает с ростом ИМТ. ИФР(т) справа слабо, но статистически значимо уменьшается с возрастом. Нижние границы референсных интервалов для ИФР(э) и ИФР(т) не зависят от рассмотренных факторов и одинаковы для правой и левой половин диафрагмы. Межисследовательская воспроизводимость ультразвуковых показателей функции диафрагмы высокая: коэффициенты внутриклассовой корреляции для различных параметров составили от 0,81 до 0,96, погрешность измерений по результатам анализа Бланда–Альтмана была небольшой относительно измеренных величин.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложена методика ультразвукового исследования функции диафрагмы. Подтверждена высокая межисследовательская воспроизводимость рассмотренных ультразвуковых параметров, предложены референсные интервалы. Индексы функционального резерва не зависят от половозрастных и конституциональных характеристик испытуемых.

## Ключевые слова:

ультразвуковое исследование диафрагмы, дисфункция диафрагмы, фракция утолщения, индекс функционального резерва диафрагмы

## Ссылка для цитирования

Евграфов П.Г., Хамидова Л.Т., Петриков С.С. Ультразвуковое исследование функции диафрагмы: методика, нормативные значения. *Журнал им. Н.В. Склифосовского неотложная медицинская помощь*. 2025;14(1):37–46. <https://doi.org/10.23934/2223-9022-2025-14-1-37-46>

## Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

## Благодарность, финансирование

Исследование не имеет спонсорской поддержки

ДД — дисфункция диафрагмы

ДИ — доверительный интервал

ИВЛ — искусственная вентиляция лёгких

ИМТ — индекс массы тела

ИФР(т) — индекс функционального резерва по утолщению

ИФР(э) — индекс функционального резерва по экскурсии

ППТ — площадь поверхности тела

УЗИ — ультразвуковое исследование

ФУ — фракция утолщения

ФУ<sub>1</sub> — фракция утолщения на спокойном вдохе

ФУ<sub>2</sub> — фракция утолщения на форсированном вдохе

## ВВЕДЕНИЕ

Дисфункция диафрагмы (ДД) широко распространена у пациентов, находящихся в критическом состоянии, и зачастую является причиной дыхательной недостаточности, требующей респираторной поддержки. Длительное нахождение пациентов на искусственной вентиляции легких (ИВЛ) приводит к атрофии диафрагмы, что затрудняет отлучение пациентов от ИВЛ и снижает выживаемость [1]. Это обуславливает потребность в динамической оценке функционального состояния диафрагмы для своевременной коррекции параметров респираторной поддержки. Ряд предложенных методов — таких как измерение трансдиафрагмального давления или электромиография диафрагмы — несмотря на надёжность, характеризуются высокой трудоёмкостью и низкой доступностью, а также не всегда применимы в условиях ИВЛ и угнетения сознания [2].

С другой стороны, ультразвуковой метод позволяет проводить динамическое измерение экскурсии и относительного утолщения диафрагмы. Показано, что ультразвуковые параметры функции диафрагмы могут быть использованы для диагностики паралича диафрагмы, а также для оценки её дисфункции, что может оказать влияние на определение готовности пациента к отлучению от ИВЛ [1, 3–5].

Впервые ультразвуковое исследование экскурсии диафрагмы в качестве альтернативы флюороскопии выполнено в 1975 году, при этом отмечены сложности, возникающие при визуализации левой половины диафрагмы, обусловленные наличием газа в желудке, и рекомендовано проводить исследование в положении Тренделенбурга после заполнения желудка водой [6]. Использование *M*-режима позволило упростить измерение экскурсии [7]. В первых исследованиях использовали продольное расположение ультразвукового датчика по срединно-ключичной линии.

Методика измерения толщины диафрагмы в *M*-режиме впервые продемонстрирована на трупном материале и здоровых добровольцах в 1989 году. При этом был использован доступ в IX межреберье по передней или средней подмышечной линии в положении пациента сидя. Была представлена высокая степень соответствия между значениями, полученными при ультразвуковом измерении толщины диафрагмы и толщиной *m.phrenicus* по патоморфологическим данным [8]. Первое применение *B*-режима для измерения толщины диафрагмы датировано 1995 годом: исследование проводили в положении пациента сидя, датчик располагали между передней и средней подмышечными линиями [9].

Визуализация диафрагмы из межребёрного доступа между срединно-ключичной и средней подмышечной линиями позволяет добиться удовлетворительного качества визуализации для обеих половин диафрагмы, а воспроизводимость полученных показателей при горизонтальном положении туловища, равно как и степень соответствия между экскурсией и дыхательным объёмом, выше, чем при вертикальном положении туловища [10].

Таким образом, единая методика ультразвукового исследования функции диафрагмы до настоящего момента не предложена.

**Цель исследования:** разработать методику ультразвукового исследования экскурсии и относительного утолщения диафрагмы у здоровых добровольцев,

предложить нормативные значения показателей для разных возрастных групп.

## МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

В исследование включён 81 испытуемый, обратившийся в НИИ СП им. Н.В. Склифосовского для проведения ультразвуковых исследований в амбулаторном порядке в период с августа 2021 года по март 2023 года. Из них мужчин 39 (48,1%), женщин 42 (51,9%); средний возраст составил 55±15 лет. Критериями исключения служили: наличие признаков острой респираторной инфекции на момент исследования, хроническая сердечная недостаточность II функционального класса (ФК) и выше (по Нью-Йоркской классификации), наличие в анамнезе оперативных вмешательств торакотомическим доступом, нейромышечные заболевания. Всем пациентам выполнено исследование диафрагмы на ультразвуковом аппарате *Philips EPIQ 7* (США) конвексным (*C 5-1*) и линейным (*eL 18-4*) датчиками. Исследование выполняли в горизонтальном положении пациента лёжа на спине. После получения информированного согласия на проведение исследования для каждого испытуемого фиксировали индекс массы тела (ИМТ), рост и площадь поверхности тела (ППТ).

С целью определения экскурсии диафрагмы конвексный датчик устанавливали во фронтальной плоскости между задней и средней подмышечными линиями справа и слева для визуализации соответствующей половины диафрагмы через межреберья. Добивались чёткого изображения диафрагмы через паренхиму печени (справа) или селезёнки (слева) (рис. 1).

При спокойном дыхании пациента смещали датчик в кранио-каудальном направлении до тех пор, пока на выдохе изображение купола диафрагмы не приближалось к левому краю сектора сканирования. Удерживая датчик в таком положении, отмечали смещение соответствующей половины диафрагмы на вдохе, фиксировали изображение и осуществляли измерение расстояния от купола диафрагмы до левого края сектора сканирования в направлении, параллельном сканирующей поверхности датчика, что соответствовало экскурсии диафрагмы на спокойном вдохе. Повторяли измерение трижды, высчитывали среднее значение. Аналогичным образом осуществляли измерение экскурсии на максимальном вдохе. Измерения выполняли билатерально. Соблюдение данной методики измерения позволяло установить истинную величину

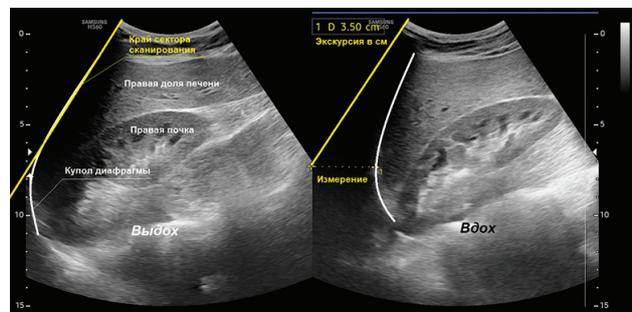


Рис. 1. Измерение экскурсии диафрагмы ультразвуковым методом. В *B*-режиме на вдохе измерено вертикальное расстояние между куполом диафрагмы и левым краем сектора сканирования Fig. 1. Sonographic measurement of diaphragm excursion. At end-inspiration in *B*-mode vertical distance between hemidiaphragm and field of view left margin is measured

смещения диафрагмы в кранио-каудальном направлении.

Далее высчитывали индекс функционального резерва диафрагмы по экскурсии (ИФР(э)):

$$\text{ИФР(э)} = \frac{\text{Экскурсия на максимальном вдохе}}{\text{Экскурсия на спокойном вдохе}}$$

Измерение толщины диафрагмы проводили линейным датчиком. В настройках программы сканирования отключали вспомогательные режимы визуализации — тканевой гармоник и многоплоскостного сканирования. Располагали датчик во фронтальной плоскости между задней и средней подмышечными линиями и смещали вертикально до получения чёткого изображения *m.phrenicus* у места её прикрепления к рёбрам; для улучшения качества визуализации допускали ротацию датчика на 5–15 градусов против часовой стрелки (справа) или по часовой стрелке (слева) для ориентирования вдоль межрёберного промежутка (рис. 2).

Толщину диафрагмы измеряли после фиксации изображения на экране на выдохе, спокойном вдохе и максимальном вдохе. Маркеры электронного измерителя располагали перпендикулярно мышечному массиву от середины одной гиперэхогенной линии, соответствующей диафрагмальной брюшине, до середины аналогичной по структуре линии, соответствующей диафрагмальной плевре. Все три измерения выполняли, не меняя наклон датчика и не смещая его. Измерения повторяли троекратно, после чего выбирали серию измерений с наименьшими значениями, которой соответствовало положение датчика, наиболее близкое к ортогональному относительно диафрагмы.

Далее вычисляли фракцию утолщения диафрагмы (ФУ) для спокойного (ФУ\_1) и максимального (ФУ\_2) вдоха:

$$\text{ФУ}_1 = \frac{\text{Толщина на спокойном вдохе} - \text{Толщина на выдохе}}{\text{Толщина на выдохе}} \times 100\%$$

$$\text{ФУ}_2 = \frac{\text{Толщина на максимальном вдохе} - \text{Толщина на выдохе}}{\text{Толщина на выдохе}} \times 100\%$$

также ИФР по толщине (ИФР(т)):

$$\text{ИФР(т)} = \frac{\text{ФУ}_2}{\text{ФУ}_1}$$

После выполнения всех измерений оператором 1 — врачом ультразвуковой диагностики с опытом самостоятельной работы по специальности 5 лет, ультразвукового исследования диафрагмы — 1 год (на момент начала набора испытуемых) оператор 2 — клинический ординатор, а впоследствии — врач ультразвуковой диагностики — выполнял измерение максимальной экскурсии диафрагмы справа и слева, толщины диафрагмы на выдохе, вдохе и максимальном вдохе, рассчитывал ФУ\_1, ФУ\_2, ИФР(т), ИФР(э). Оператор 2 был ослеплен по отношению к результатам измерений оператора 1.

Нормальность распределения оценивали с помощью критерия Шапиро-Уилка и графическим методом (график «квантиль–квантиль»). При распределениях, отличных от нормального, результат описывали в виде «Медиана (2,5-й процентиль; 97,5-й процентиль)», а статистическую значимость межгрупповых отличий оценивали с помощью непараметрического критерия Манна–Уитни. Значимость межгрупповых различий по качественным признакам оценивали с помощью критерия хи-квадрат. Наличие линейной взаимосвязи между количественными величинами оценивали с помощью коэффициента корреляции Пирсона и линейной регрессии с прямым пошаговым отбором регрессоров, исходя из значения информационного критерия Акаике с предварительной трансформацией данных по методу Бокса–Кокса. Межисследовательскую воспроизводимость ультразвуковых параметров оценивали с помощью метода пределов согласия Бланда–Альтмана и коэффициента внутрикласовой корреляции. С учётом ограниченного объёма выборки и отличия распределения большинства показателей от нормального референсные интервалы определены непараметрическим методом — с помощью процентилей. 95% доверительные интервалы (ДИ) для нижней и верхней границы референсных интервалов определены

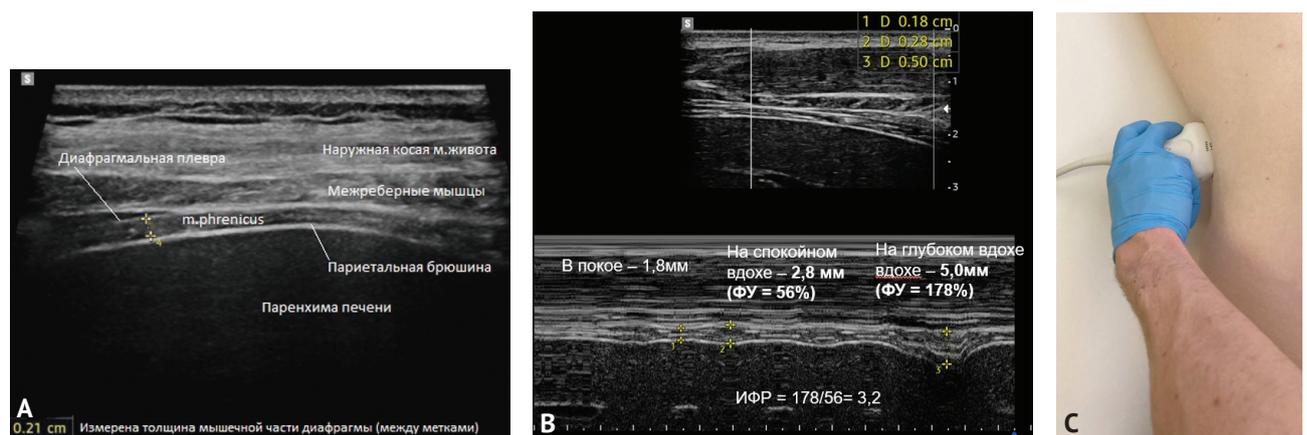


Рис. 2. Измерение толщины диафрагмы на выдохе, вдохе и максимальном вдохе ультразвуковым методом. Расчёт ФУ\_1, ФУ\_2, ИФР(т). А — ультразвуковое изображение с подписями. Измерение толщины диафрагмы производят перпендикулярно направлению мышечных волокон между гиперэхогенными линиями, соответствующими диафрагмальной плевре и брюшине; В — расчёт ФУ\_1, ФУ\_2, ИФР(т). Для наглядности все три измерения толщины выполнены в М-режиме; С — положение ультразвукового датчика между задней и средней подмышечными линиями. Плоскость сканирования ориентирована фронтально, перпендикулярно к направлению экскурсии диафрагмы

Примечания: ИФР(т) — индекс функционального резерва по утолщению; ФУ\_1 — фракция утолщения на спокойном вдохе; ФУ\_2 — фракция утолщения на форсированном вдохе

Fig. 2. Sonographic measurement of diaphragm thickness on end-expiration, tidal and forced inspiration. Calculation of TF\_1, TF\_2, IFR(t). A — ultrasonographic image with captions; Diaphragm thickness measurement is done perpendicular to muscle fibers orientation, between two hyperechoic lines representing diaphragmatic pleura and peritoneum. B — calculation of TF\_1, TF\_2, IFR(t); For the sake of clarity, all three thickness measurements are done in M-mode. C — positioning of an ultrasound probe. Scanning plane is frontal, perpendicular to diaphragm excursion direction

Notes: ИФР(т) — functional reserve index for thickening; ФУ\_1 — thickening fraction during tidal breathing; ФУ\_2 — thickening fraction during deep inhalation

ны с помощью бутстрепа (при числе измерений менее 120) или непараметрическими методами (при числе измерений от 120), согласно общепринятым рекомендациям (*Defining, Establishing and Verifying Reference Intervals in the Clinical Laboratory; Approved Guideline – 3rd Edition (C28-A3)*). Единичные выбросы определяли по методу расстояния Кука среди значений всех исследуемых переменных, они не учитывались при расчёте референсных интервалов. Для статистических расчётов использовали программное обеспечение *Microsoft Excel 2007, MedCalc 23.0.5, RStudio 2023.03.0*.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Визуализация диафрагмы с обеих сторон с оценкой экскурсии и толщины диафрагмы на вдохе и на выдохе успешно осуществлена у 100% испытуемых. Для оценки влияния возраста на оцениваемые параметры все испытуемые дополнительно разделены на три подгруппы:

- подгруппа 1 – 18–45 лет – 24 человека, из которых 10 (41,7%) женщин, 14 (58,3%) мужчин;
- подгруппа 2 – 46–59 лет – 27 человек, из которых 15 (55,6%) женщин, 12 (44,4%) мужчин;
- подгруппа 3 – 60 и более лет – 30 человек, из которых 17 (56,7%) женщин, 13 (43,3%) мужчин.

По половой структуре подгруппы были однородны ( $p=0,468$ ).

По результатам теста Шапиро–Уилка и графической оценки, статистически значимых отклонений от нормального распределения для возраста, роста, ИМТ

и ППТ не выявлено ( $p>0,05$ ). Распределение значений максимальной экскурсии справа и слева, ФУ на максимальном вдохе справа и слева, ФУ на спокойном вдохе слева, ИФР(э) и ИФР(т) справа и слева статистически значимо отличалось от нормального, а именно – распределение значений для всех параметров характеризовалось положительной асимметрией (скошенностью вправо), после трансформации данных распределение всех параметров нормализовано (рис. 3). По данным корреляционного анализа, выявлен ряд статистически значимых корреляционных зависимостей (рис. 4).

Из данных корреляционной матрицы (рис. 4) следует, что между исследуемыми параметрами существует высокая степень статистически значимой мультиколлинеарности (взаимной зависимости): отмечаются статистически значимые корреляционные зависимости между характеристиками пациентов (возраст, пол, рост, ИМТ, ППТ) и ультразвуковыми параметрами функции диафрагмы, а также между различными ультразвуковыми параметрами функции диафрагмы.

Для определения независимого влияния каждой из характеристик пациентов на значение ультразвуковых параметров функции диафрагмы проведён линейный регрессионный анализ (табл. 1).

По данным линейного регрессионного анализа:

- экскурсия диафрагмы на максимальном вдохе справа и слева статистически значимо падает с возрастом ( $p<0,001$ ) и имеет большие значения у лиц мужского пола ( $p=0,0147$ ) (рис. 5);

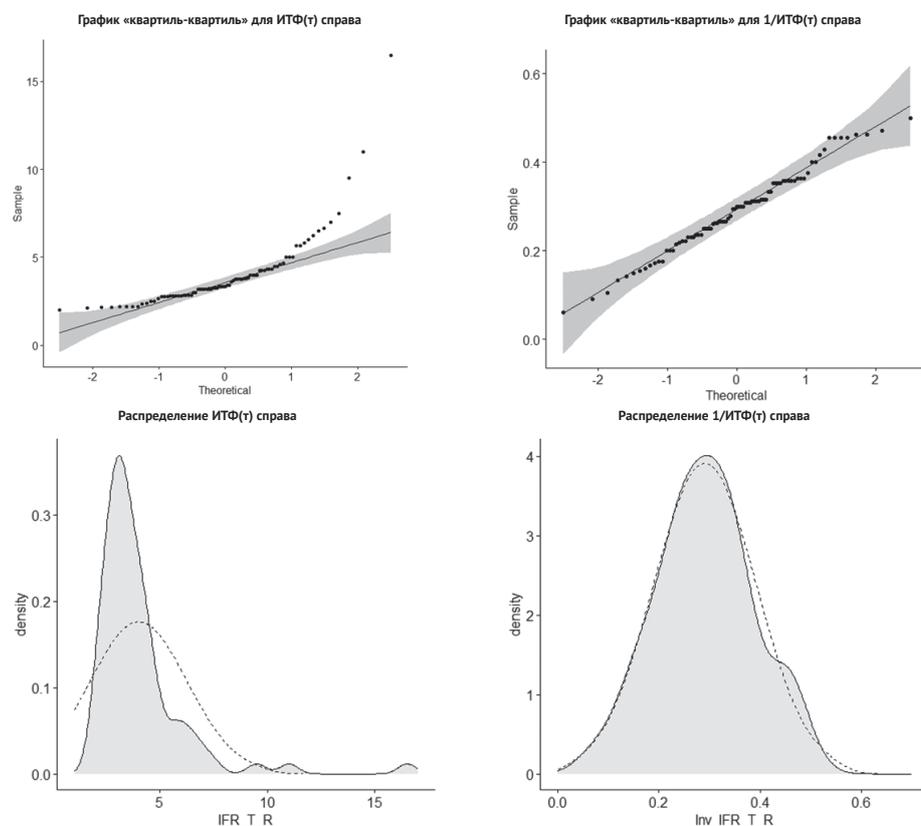


Рис. 3. Пример трансформации Бокса–Кокса значений индекса функционального резерва по утолщению (ИФР(т),  $IFR_T$ ) правой половины диафрагмы для нормализации распределения полученных значений. Пунктиром обозначено теоретическое нормальное распределение, сплошной линией с серой заливкой – реальное распределение. После трансформации данных (график справа) распределения близки  
Примечание:  $1/IFR_T$  ( $Inv\_IFR_T$ ) – индекс функционального резерва по утолщению, преобразованные значения  
Fig. 3. Box–Cox transformation of functional reserve index for thickening (IFR(t)) values for normalization of the parameter distribution. Theoretical normal distribution is shown with dotted line, actual data distribution – with solid line and gray fill. After data transformation the two distributions are close to each other

Note:  $Inv\_IFR_T$  – functional reserve index for thickening, transformed values

- толщина диафрагмы на выдохе (в покое) растёт с увеличением ППТ ( $p < 0,001$ ) и не зависит от возраста;
- ФУ\_1 слева падает с увеличением ИМТ ( $p = 0,0483$ );
- ИФР(т) справа слабо, но статистически значимо снижается с возрастом ( $p = 0,0295$ ), причём нижняя граница референсного интервала от возраста не зависит (табл. 1);
- для остальных показателей, включая ФУ\_2, ИФР(т) слева, ИФР(э) справа и слева, статистически значимых регрессоров не выявлено ( $p > 0,05$ ).

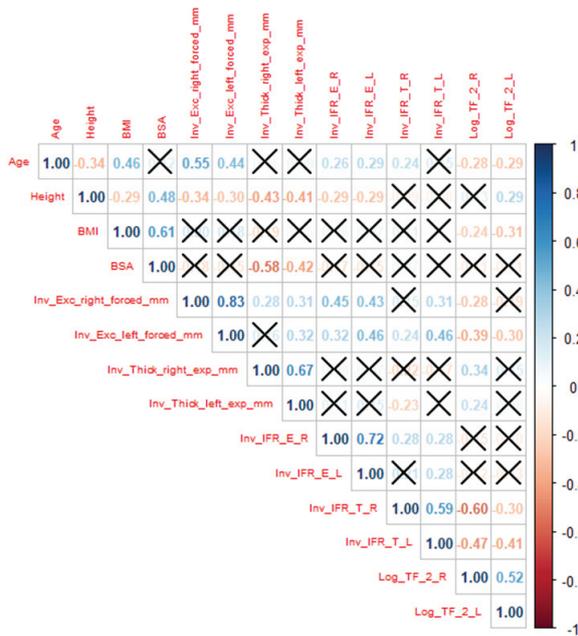


Рис. 4. Корреляционная матрица основных параметров испытываемых и оцениваемых ультразвуковых параметров функции диафрагмы. Примечания: Число в ячейке — значение коэффициента корреляции Пирсона между параметрами, указанными в заголовках строк и столбцов, цвет шрифта соответствует значению коэффициента по приведённой справа шкале. Знак «X» в ячейке означает отсутствие статистически значимой корреляционной зависимости между параметрами в соответствующих столбце и строке. Age — возраст; Height — рост; BMI — индекс массы тела; BSA — площадь поверхности тела; Inv\_Exc\_right\_forced\_mm — максимальная экскурсия правой половины диафрагмы (значения преобразованы с помощью обратной степенной функции); Inv\_Thick\_right(left)\_exp\_mm — толщина правой (левой) половины диафрагмы (значения преобразованы с помощью обратной степенной функции); Inv\_IFR\_E\_R(L) — индекс функционального резерва по экскурсии справа (слева) (значения преобразованы с помощью обратной степенной функции); Inv\_IFR\_T\_R(L) — индекс функционального резерва по утолщению справа (слева) (значения преобразованы с помощью обратной степенной функции); Log\_TF\_2\_R(L) — фракция утолщения на форсированном вдохе справа (слева) (значения преобразованы с помощью логарифмической трансформации).

Fig. 4. Correlation matrix of main sonographic diaphragm function parameters of study subjects

Notes: The number in the cell is the value of the Pearson correlation coefficient between the parameters specified in the row and column headings, the font color corresponds to the coefficient value on the scale shown on the right. Sign "X" in a cell means no statistically significant relation between parameters in the corresponding column and line. BMI — body mass index; BSA — body surface area; Inv\_Exc\_right\_forced\_mm — maximal excursion of right hemidiaphragm (values transformed with inverse power function); Inv\_Thick\_right(left)\_exp\_mm — right (left) m. phrenicus thickness (values transformed with inverse power function); Inv\_IFR\_E\_R(L) — functional reserve index for excursion of right (left) hemidiaphragm (values transformed with inverse power function); Inv\_IFR\_T\_R(L) — functional reserve index for thickening of right (left) m.phrenicus (values transformed with inverse power function); Log\_TF\_2\_R(L) — thickening fraction for deep inhalation for right (left) hemidiaphragm (values transformed with inverse log function)

С учётом выявленных регрессоров, предложены референсные значения рассмотренных ультразвуковых параметров по подгруппам (табл. 2).

Как видно из таблицы, референсные интервалы для экскурсии диафрагмы на спокойном и максимальном вдохе различаются в зависимости от пола и возрастной группы. Толщина диафрагмы на выдохе увеличивается с ростом ППТ. ФУ левой половины диафрагмы на спокойном вдохе слева уменьшается с ростом ИМТ. Нижние границы референсных интервалов для ИФР(э) и ИФР(т) едины для правой и левой половин диафрагмы и не зависят от пола, возраста, ИМТ и ППТ.

Межисследовательская воспроизводимость ультразвуковых показателей функции диафрагмы оценена с помощью 2 методов: коэффициента внутрикласовой корреляции и метода Бланда–Альтмана (табл. 3).

Высокие значения коэффициентов внутрикласовой корреляции и узкие относительно измеряемых величин диапазоны согласия свидетельствуют о достаточной межисследовательской воспроизводимости. Разность измерений всех параметров между операторами значимо не отличается от 0 ( $p > 0,05$ ), что позволяет сделать вывод об отсутствии статистически значимой систематической погрешности измерений.

## ОБСУЖДЕНИЕ

Для измерения экскурсии диафрагмы был выбран способ с расположением ультразвукового датчика между средней и задней подмышечными линиями по межреберьям во фронтальной плоскости. Предложенный рядом авторов способ с использованием M-режима по срединно-ключичной линии не всегда позволяет добиться ортогональной ориентации сектора сканирования относительно диафрагмы; кроме того, у не подготовленных к исследованию пациентов с конституциональными особенностями визуализация левой половины диафрагмы этим доступом в фазе

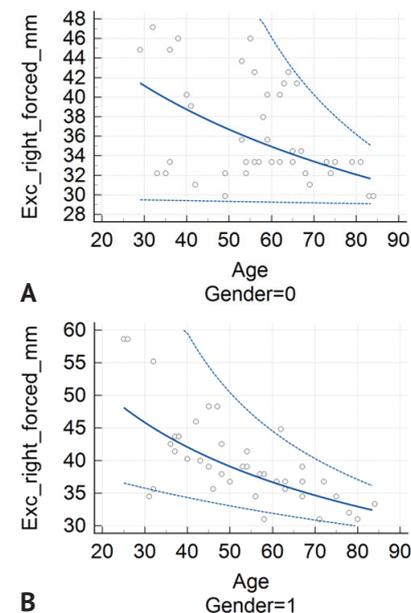


Рис. 5. График зависимости максимальной экскурсии диафрагмы справа от возраста у лиц женского (А) и мужского (В) пола. Сплошной линией показана регрессионная кривая, пунктирными линиями — 95% доверительные границы

Fig. 5. Graphic representation of maximal right hemidiaphragm excursion depending on age in females (A) and males (B). Regression curves are shown by solid lines, 95% confidence bounds — by dotted lines

Таблица 1

## Регрессионный анализ зависимости ультразвуковых показателей функции диафрагмы от характеристик испытуемых

Table 1

## Regression analysis output: diaphragm ultrasonographic parameters and subject characteristics

	Оценочное значение коэффициента регрессии ( $b_0$ )	Стандартная ошибка	Статистическая значимость ( $p$ )
Максимальная экскурсия СПРАВА**			
Постоянная ( $b_0$ )	0,0003978	0,00007552	<b>0,00000119*</b>
Возраст	0,000007093	0,000001249	<b>0,000000223*</b>
Мужской пол	0,00009339	0,00003744	<b>0,0147*</b>
Максимальная экскурсия СЛЕВА**			
Постоянная ( $b_0$ )	0,0004219	0,00008589	<b>0,00000486*</b>
Возраст	0,000005761	0,000001420	<b>0,000117*</b>
Мужской пол	0,001156	0,00004258	<b>0,008134*</b>
Толщина диафрагмы на выдохе СПРАВА**			
Постоянная ( $b_0$ )	0,9732	0,10391	<b>&lt;0,00000001*</b>
Площадь поверхности тела	-0,33251	0,05288	<b>0,000000166*</b>
Толщина диафрагмы на выдохе СЛЕВА**			
Постоянная ( $b_0$ )	0,92039	0,09043	<b>&lt;0,00000001*</b>
Площадь поверхности тела	-0,18767	0,04602	<b>0,000108*</b>
Фракция утолщения на спокойном выдохе СЛЕВА			
Постоянная ( $b_0$ )	3,358291	0,242678	<b>&lt;0,00000001*</b>
Индекс массы тела	-0,01758	0,008765	<b>0,0483*</b>
Индекс функционального резерва по утолщению СПРАВА**			
Постоянная ( $b_0$ )	0,2067904	0,0393417	<b>0,0000012*</b>
Возраст	0,0015359	0,0006929	<b>0,0295*</b>

Примечания: \* –  $p < 0,05$ ; \*\* – значения зависимой переменной трансформированы с помощью обратной степенной функции, поэтому положительному значению коэффициента регрессии соответствует обратная зависимость и наоборот

Notes: \* –  $p < 0,05$ ; \*\* – values of independent variable are transformed with inverse power function, hence positive regression coefficient means inverse relationship and visa versa

выдоха не всегда возможна [11]. При оценке экскурсии диафрагмы из подреберного доступа по срединно-ключичной линии в положении стоя измерение экскурсии левой половины диафрагмы возможно лишь у 21,4% испытуемых [12]. При использовании подреберного доступа абсолютная погрешность определения экскурсии диафрагмы на форсированном выдохе достигает 10 мм, относительная погрешность определения экскурсии левой половины превышает 30% измеренной величины [13]. Исходя из литературных сведений о меньшей воспроизводимости левосторонних показателей, в данном исследовании оценивали межисследовательскую воспроизводимость именно для них.

Описан способ измерения экскурсии диафрагмы относительно ворот правой почки в положении пациента полусидя (головной конец кровати под углом 30–45 градусов к горизонтали) [14]. Воспроизводимость измерений, полученных данным методом, вызывает сомнения, поскольку в норме почка смещается при акте дыхания.

По данным *Skaarup et al.*, значения экскурсии диафрагмы, полученные при ультразвуковом исследовании в М-режиме из подреберного доступа по срединно-ключичной линии, более соответствуют флюороскопическим измерениям, чем аналогичные

Таблица 2

## Расчётные референсные интервалы для основных ультразвуковых показателей функции диафрагмы

Table 2

## Reference ranges for main sonographic parameters of diaphragm function

Показатель	Подгруппа	2,5 процентиль (95% ДИ)	97,5 процентиль (95% ДИ)
Экскурсия справа (спокойный вдох), мм	18–45 лет	16 [15–16]	26 [26–29]
	46–59 лет	15 [14–15]	23 [23–25]
	60+ лет	15 [14–15]	22 [22–23]
Экскурсия слева (спокойный вдох), мм	18–45 лет	16 [14–16]	28 [28–30]
	46–59 лет	15 [13–15]	24 [24–28]
	60+ лет	16 [15–16]	22 [22–23]
Максимальная экскурсия справа, мм	Женщины 18–45 лет	31 [29–31]	47 [47–49]
	Женщины 46–59 лет	30 [26–30]	46 [46–52]
	Женщины 60+ лет	30 [28–30]	43 [43–45]
	Мужчины 18–45 лет	35 [29–35]	59 [59–69]
	Мужчины 46–59 лет	31 [25–31]	48 [48–58]
	Мужчины 60+ лет	31 [29–31]	45 [45–53]
Максимальная экскурсия слева, мм	Женщины 18–45 лет	29 [24–29]	53 [53–58]
	Женщины 46–59 лет	31 [28–31]	47 [47–55]
	Женщины 60+ лет	30 [28–30]	43 [43–45]
	Мужчины 18–45 лет	36 [29–36]	62 [62–74]
	Мужчины 46–59 лет	28 [17–28]	58 [58–71]
	Мужчины 60+ лет	31 [25–31]	47 [47–54]
Толщина на выдохе справа, мм	Площадь поверхности тела до 1,80 м <sup>2</sup>	1,4 [1,3–1,4]	1,7 [1,7–1,8]
	Площадь поверхности тела 1,81–1,95 м <sup>2</sup>	1,4 [1,4–1,4]	2,3 [2,3–2,7]
	Площадь поверхности тела 1,96–2,10 м <sup>2</sup>	1,6 [1,5–1,6]	2,4 [2,4–2,5]
	Площадь поверхности тела от 2,11 м <sup>2</sup>	1,6 [1,5–1,6]	2,4 [2,4–2,5]
Толщина на выдохе слева, мм	Площадь поверхности тела до 1,80 м <sup>2</sup>	1,5 [1,4–1,5]	1,9 [1,9–2,1]
	Площадь поверхности тела 1,81–1,95 м <sup>2</sup>	1,4 [1,4–1,4]	2,2 [2,2–2,4]
	Площадь поверхности тела 1,96–2,10 м <sup>2</sup>	1,6 [1,5–1,6]	2,2 [2,2–2,2]
	Площадь поверхности тела от 2,11 м <sup>2</sup>	1,6 [1,4–1,6]	2,5 [2,5–2,9]
Фракция утолщения на спокойном выдохе справа, %		11 [8–11]	38 [38–40]
Фракция утолщения на спокойном выдохе слева, %	Индекс массы тела менее 25,0	6 [6–6]	44 [44–54]
	Индекс массы тела 25,0–29,9	11 [6–11]	33 [33–38]
	Индекс массы тела 30,0–34,9	11 [6–11]	39 [39–44]
	Индекс массы тела от 35,0	8 [2–8]	19 [19–29]
Фракция утолщения на форсированном выдохе справа и слева, %		44 [35–52]	139 [129–144]
Индекс функционального резерва по экскурсии справа и слева		1,7 [1,5–1,7]	2,4 [2,3–2,5]
Индекс функционального резерва по утолщению справа и слева		2,1 [1,7–2,2]	7,3 [6,5–7,5]

Примечание: ДИ – доверительный интервал

Note: ДИ – confidence interval

данные, полученные при использовании латерального доступа. Однако авторы ссылаются на методику *Houston*, предполагающую установку датчика между срединно-ключичной и средней подмышечной линиями, но не уточняют, в каком конкретно положении находился датчик при измерении экскурсии, а это могло оказать большое влияние на результаты измерений [10, 15].

Визуализация диафрагмы из межрёберного акустического окна по средней подмышечной линии во фронтальной плоскости позволяет добиться визуализации у всех исследуемых как справа, так и слева. Значение экскурсии диафрагмы на максимальном выдохе менее 25 может использоваться в качестве при-

Таблица 3

## Показатели воспроизводимости для параметров функции диафрагмы, измеренных ультразвуковым методом

Table 3

## Reproducibility of sonographic parameters of diaphragm function

Показатель	Коэффициент внутриклассовой корреляции (с 95% ДИ)	Нижняя граница 95% предела согласия	Верхняя граница 95% предела согласия	Усредненная разность измерений двух операторов (с 95% ДИ)
Максимальная экскурсия справа, мм	0,93 [0,89–0,96]	-5	+7	1 [0–2]
Максимальная экскурсия слева, мм	0,95 [0,91–0,96]	-6	+7	1 [0–2]
Толщина в покое слева, мм	0,91 [0,86–0,94]	-0,3	+0,2	0 [-1–0]
Фракция утолщения на спокойном вдохе слева, %	0,91 [0,86–0,94]	-11	+10	0 [-1–+1]
Индекс функционального резерва по экскурсии слева	0,81 [0,70–0,88]	-0,5	+0,4	-0,1 [-0,1–0]
Индекс функционального резерва по утолщению слева	0,96 [0,95–0,98]	-1,3	+1,4	0 [-0,2–+0,2]

Примечание: ДИ – доверительный интервал

Note: ДИ – confidence interval

знака её выраженной дисфункции [16]. В данном исследовании предложена нижняя граница нормы максимальной экскурсии правой половины диафрагмы от 28 до 35 мм в зависимости от стороны исследования, пола и возраста испытуемых, что не противоречит литературным данным.

Полученные при измерении толщины диафрагмы в положении лёжа значения обладают не менее высокой воспроизводимостью, чем полученные при измерении в вертикальном положении [17]. Аналогичные данные продемонстрированы в нашем исследовании, что позволяет рекомендовать использование данной методики у пациентов в критическом состоянии. При вертикальном положении туловища толщина диафрагмы как в покое, так и на максимальном вдохе в среднем на 20% выше, чем в горизонтальном положении, однако соотношение толщины на вдохе и в покое остаётся постоянным, что и делает целесообразным применение расчётных индексов относительного утолщения диафрагмы на вдохе [18].

При измерении толщины и фракции утолщения диафрагмы у пациентов, находящихся на ИВЛ в положении пациента лёжа на спине, показатели для правой половины диафрагмы характеризуются достаточной внутри- и межисследовательской воспроизводимостью, особенно при маркировке позиции датчика для повторных измерений. Частота успешной визуализации левой половины диафрагмы недостаточна для измерения соответствующих показателей у большинства пациентов [2]. Фракция утолщения диафрагмы уменьшается с ростом давления респираторной поддержки и стремится к нулю при миорелаксации. Более того, показано, что при величине объёма вдоха менее 50% жизненной ёмкости лёгких относительное утолщение диафрагмы практически целиком обусловлено её сократительной активностью, а при значениях объёма вдоха, приближающихся к жизненной ёмкости лёгких, значимый вклад в величину ФУ оказывает пассивное смещение диафрагмы. Поэтому использование фракции утолщения диафрагмы в качестве суррогата её мышечной активности при спокойном дыхании оправдано, чем дополнительно объясняется целесообразность расчёта ФУ диафрагмы [2].

При измерении в положении лежа на спине толщина диафрагмы в конце выдоха у мужчин, по опубликованным данным, статистически значимо выше, чем у женщин (0,19±0,04 см и 0,14±0,03 см соответственно). Зависимость толщины диафрагмы от окружности груди и индекса массы тела не достигает уровня

статистической значимости [19]. При измерении в положении лёжа на спине показано, что толщина диафрагмы статистически значимо коррелирует с ростом, весом и индексом массы тела испытуемых, а у мужчин толщина диафрагмы значимо больше, чем у женщин [20]. При исследовании в положении сидя толщина диафрагмы у женщин статистически значимо меньше, чем у мужчин, однако ФУ не зависит от пола [21]. Согласно данным В.С. Шабаева и соавт. (2023), при ультразвуковом исследовании диафрагмы в положении лёжа на спине у здоровых добровольцев отмечаются половые различия по толщине диафрагмы во все фазы дыхания, а также по величине максимальной экскурсии, измеренной из подрёберного доступа по срединно-ключичной линии справа [11]. Толщина диафрагмы больше у мужчин, чем у женщин, также толщина диафрагмы растёт с увеличением индекса массы тела; возраст и пол значимо не влияют на толщину диафрагмы и ФУ [22]. Применение регрессионного анализа в данном исследовании позволило продемонстрировать, что ППТ является единственным независимым предиктором толщины диафрагмы на выдохе, а половозрастные различия вторичны по отношению к значениям ППТ в соответствующих подгруппах.

При измерении толщины диафрагмы воспроизводимость полученных значений выше в М-режиме, однако в руках опытного оператора в В-режиме значения также характеризуются достаточной воспроизводимостью, причём визуализация левой половины диафрагмы также удовлетворительная [2]. В данном исследовании доказана достаточная межисследовательская воспроизводимость измерений толщины для левой половины диафрагмы.

Показано, что наибольшей воспроизводимостью обладают значения толщины диафрагмы, полученные при измерении по средней подмышечной линии [23]. Это не противоречит методике, описанной в настоящем исследовании.

#### Ограничения исследования

К вероятным ограничениям настоящего исследования следует прежде всего отнести небольшой объём выборки. Однако структура её была сбалансирована по половозрастным показателям, а все предложенные референсные значения приведены с доверительными интервалами, статистические критерии — с уровнями статистической значимости. Показатели межисследовательской воспроизводимости определяли главным образом для левой гемидиафрагмы, что обусловлено литературными данными о сопоставимой или мень-

шей межисследовательской воспроизводимости для ультразвуковых показателей левой половины диафрагмы.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложена методика ультразвукового исследования функции диафрагмы с использованием межрёберного билатерального акустического доступа. Доказана возможность ультразвуковой визуализации правой и левой гемидиафрагмы у всех испытуемых с последующим расчётом фракции утолщения для спокойного и форсированного вдохов. Впервые предложено рассчитывать ультразвуковые индексы функционального резерва по экскурсии и толщине — показатели, характеризующие соотношение показателей экскурсии и относительного утолщения, полученные при спокойном и форсированном вдохе. Нижние границы референсных интервалов для индексов функционального резерва по толщине и экскурсии справа и слева универсальны для всех половозрастных групп и рассмотренных конституциональных характеристик испытуемых. Подтверждена высокая межисследовательская воспроизводимость рассмотренных ультразвуковых параметров.

### ВЫВОДЫ

Для билатерального ультразвукового исследования диафрагмы предложено использовать межрёберный доступ между задней и средней подмышечными линиями.

1. Экскурсия и толщина диафрагмы, измеренные при ультразвуковом исследовании, характеризуются зависимостью от половозрастных и конституциональных характеристик испытуемых:

— экскурсия диафрагмы на спокойном вдохе статистически значимо снижается с возрастом (справа —

с 16–26 до 15–22 мм, слева — с 16–28 мм до 16–22 мм) ( $p < 0,05$ );

— максимальная экскурсия диафрагмы статистически значимо снижается с возрастом, у мужчин максимальная экскурсия больше ( $p < 0,05$ );

— толщина диафрагмы в покое статистически значимо прямо зависит от площади поверхности тела, увеличиваясь справа с 1,4–1,7 мм (площадь поверхности тела менее 1,81 м<sup>2</sup>) до 1,6–2,4 мм (площадь поверхности тела от 2,11 м<sup>2</sup>); слева — с 1,5–1,9 мм (площадь поверхности тела менее 1,81 м<sup>2</sup>) до 1,6–2,5 мм (площадь поверхности тела от 2,11 м<sup>2</sup>);

— фракция утолщения для спокойного вдоха слева статистически значимо уменьшается с ростом индекса массы тела ( $p < 0,05$ );

— фракция утолщения для спокойного вдоха справа, для глубокого вдоха справа и слева статистически значимо не зависят от половозрастных характеристик ( $p < 0,05$ ).

2. Нижняя граница референсного интервала для индексов функционального резерва по экскурсии и утолщению не зависит от половозрастных и конституциональных характеристик испытуемых, поэтому предложены универсальные нижние референсные границы — соответственно 1,7 и 2,1.

3. Все рассмотренные ультразвуковые показатели функции диафрагмы характеризуются достаточной межисследовательской воспроизводимостью: коэффициенты внутриклассовой корреляции составили от 0,81 для индекса функционального резерва по экскурсии слева до 0,96 для индекса функционального резерва по утолщению слева, статистически значимая систематическая ошибка при измерении двумя операторами всех рассмотренных показателей не выявлена ( $p > 0,05$ ).

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- Zambon M, Greco M, Bocchino S, Cabrini L, Beccaria PF, Zangrillo A. Assessment of diaphragmatic dysfunction in the critically ill patient with ultrasound: a systematic review. *Intensive Care Med.* 2017;43(1):29–38. PMID: 27620292 <https://doi.org/10.1007/s00134-016-4524-z>
- Goligher EC, Laghi F, Detsky ME, Farias P, Murray A, Brace D, et al. Measuring diaphragm thickness with ultrasound in mechanically ventilated patients: feasibility, reproducibility and validity. *Intensive Care Med.* 2015;41(4):642–649. PMID: 25693448 <https://doi.org/10.1007/s00134-015-3687-3>
- Boussuges A, Rives S, Finance J, Brégeon F. Assessment of diaphragmatic function by ultrasonography: Current approach and perspectives. *WJCC.* 2020;8(12):2408–2424. PMID: 32607319 <https://doi.org/10.12998/wjcc.v8.i12.2408>
- Tuinman PR, Jonkman AH, Dres M, Shi ZH, Goligher EC, Goffi A, et al. Respiratory muscle ultrasonography: methodology, basic and advanced principles and clinical applications in ICU and ED patients—a narrative review. *Intensive Care Med.* 2020;46(4):594–605. PMID: 31938825 <https://doi.org/10.1007/s00134-019-05892-8>
- Vetrugno L, Guadagnin GM, Barbariol F, Langiano N, Zangrillo A, Bove T. Ultrasound Imaging for Diaphragm Dysfunction: A Narrative Literature Review. *Journal of Cardiothoracic and Vascular Anesthesia.* 2019;33(9):2525–2536. PMID: 30686657 <https://doi.org/10.1053/j.jvca.2019.01.003>
- Miskin M. B-Mode Ultrasonographic Study of Diaphragmatic Motion. In: White D, ed. *Ultrasound in Medicine.* Springer US; 1975:169–176. [https://doi.org/10.1007/978-1-4613-4443-8\\_49](https://doi.org/10.1007/978-1-4613-4443-8_49)
- Haber K, Asher WM, Freimanis AK. Echographic Evaluation of Diaphragmatic Motion in Intra-abdominal Diseases. *Radiology.* 1975;114(1):141–144. PMID: 1208854 <https://doi.org/10.1148/114.1.141>
- Wait JL, Nahormek PA, Yost WT, Rochester DP. Diaphragmatic thickness-lung volume relationship in vivo. *Journal of Applied Physiology.* 1989;67(4):1560–1568. PMID: 2676955 <https://doi.org/10.1152/jappl.1989.67.4.1560>
- Ueki J, De Bruin PF, Pride NB. In vivo assessment of diaphragm contraction by ultrasound in normal subjects. *Thorax.* 1995;50(11):1157–1161. PMID: 8553271 <https://doi.org/10.1136/thx.50.11.1157>
- Houston JG, Angus RM, Cowan MD, McMillan NC, Thomson NC. Ultrasound assessment of normal hemidiaphragmatic movement: relation to inspiratory volume. *Thorax.* 1994;49(5):500–503. PMID: 8016774 <https://doi.org/10.1136/thx.49.5.500>
- Шаббаев В.С., Оразмагомедова И.В., Мазурок В.А., Березина А.В., Васильева Л.Г., Александрова Д.А. Сонографические показатели диафрагмы у здоровых лиц. *Анестезиология и реаниматология.* 2023;(2):44–50. <https://doi.org/10.17116/anaesthesiology202302144>
- Boussuges A, Gole Y, Blanc P. Diaphragmatic Motion Studied by M-Mode Ultrasonography. *Chest.* 2009;135(2):391–400. PMID: 19017880 <https://doi.org/10.1378/chest.08-1541>
- Testa A, Soldati G, Giannuzzi R, Berardi S, Portale G, Gentiloni Silveri N. Ultrasound M-Mode Assessment of Diaphragmatic Kinetics by Anterior Transverse Scanning in Healthy Subjects. *Ultrasound in Medicine & Biology.* 2011;37(1):44–52. PMID: 21144957 <https://doi.org/10.1016/j.ultrasmedbio.2010.10.004>
- Scott S, Fuld JP, Carter R, McEntegart M, MacFarlane NG. Diaphragm Ultrasonography as an Alternative to Whole-Body Plethysmography in Pulmonary Function Testing. *Journal of Ultrasound in Medicine.* 2006;25(2):225–232. PMID: 16439786 <https://doi.org/10.7863/jum.2006.25.2.225>
- Skaarup SH, Juhl-Olsen P, Grundahl AS, Løgstrup BB. Replacement of fluoroscopy by ultrasonography in the evaluation of hemidiaphragm function, an exploratory prospective study. *Ultrasound J.* 2024;16(1):1. PMID: 38189895 <https://doi.org/10.1186/s13089-023-00355-0>
- Lerolle N, Guérot E, Dimassi S, Zegdi R, Faisy C, Fagon JY, et al. Ultrasonographic Diagnostic Criterion for Severe Diaphragmatic Dysfunction After Cardiac Surgery. *Chest.* 2009;135(2):401–407. PMID: 18753469 <https://doi.org/10.1378/chest.08-1531>

17. Baldwin CE, Paratz JD, Bersten AD. Diaphragm and peripheral muscle thickness on ultrasound: Intra-rater reliability and variability of a methodology using non-standard recumbent positions. *Respirology*. 2011;16(7):1136–1143. PMID: 21645172 <https://doi.org/10.1111/j.1440-1843.2011.02005.x>
18. Hellyer NJ, Andreas NM, Bernstetter AS, Cieslak KR, Donahue GF, Steiner EA, et al. Comparison of Diaphragm Thickness Measurements Among Postures Via Ultrasound Imaging. *PM&R*. 2017;9(1):21–25. PMID: 27297447 <https://doi.org/10.1016/j.pmrj.2016.06.001>
19. Carrillo-Esper R, Pérez-Calatayud AA, Arch-Tirado E, Díaz-Carrillo MA, Garrido-Aguirre E, Tapia-Velazco R, et al. Standardization of Sonographic Diaphragm Thickness Evaluations in Healthy Volunteers. *Respir Care*. 2016;61(7):920–924. PMID: 27072012 <https://doi.org/10.4187/respcare.03999>
20. Seok JI, Kim SY, Walker FO, Kwak SG, Kwon DH. Ultrasonographic findings of the normal diaphragm: thickness and contractility. *Ann Clin Neurophysiol*. 2017;19(2):131. <https://doi.org/10.14253/acn.2017.19.2.131>
21. Boussuges A, Rives S, Finance J, Chaumet G, Vallée N, Risso JJ, et al. Ultrasound Assessment of Diaphragm Thickness and Thickening: Reference Values and Limits of Normality When in a Seated Position. *Front Med*. 2021;8:742703. PMID: 34778304 <https://doi.org/10.3389/fmed.2021.742703>
22. Van Doorn JLM, Wijntjes J, Saris CGJ, Ottenheim CAC, Van Alfen N, Doorduyn J. Association of diaphragm thickness and echogenicity with age, sex, and body mass index in healthy subjects. *Muscle and Nerve*. 2022;66(2):197–202. PMID: 35583147 <https://doi.org/10.1002/mus.27639>
23. Haaksma ME, Van Tienhoven AJ, Smit JM, Heldeweg MLA, Lissenberg-Witte BI, Wennen M, et al. Anatomical Variation in Diaphragm Thickness Assessed with Ultrasound in Healthy Volunteers. *Ultrasound in Medicine & Biology*. 2022;48(9):1833–1839. PMID: 35691733 <https://doi.org/10.1016/j.ultrasmedbio.2022.05.008>

## REFERENCES

1. Zambon M, Greco M, Bocchino S, Cabrini L, Beccaria PF, Zangrillo A. Assessment of diaphragmatic dysfunction in the critically ill patient with ultrasound: a systematic review. *Intensive Care Med*. 2017;43(1):29–38. PMID: 27620292 <https://doi.org/10.1007/s00134-016-4524-z>
2. Goligher EC, Laghi F, Detsky ME, Farias P, Murray A, Brace D, et al. Measuring diaphragm thickness with ultrasound in mechanically ventilated patients: feasibility, reproducibility and validity. *Intensive Care Med*. 2015;41(4):642–649. PMID: 25693448 <https://doi.org/10.1007/s00134-015-3687-3>
3. Boussuges A, Rives S, Finance J, Brégeon F. Assessment of diaphragmatic function by ultrasonography: Current approach and perspectives. *WJCC*. 2020;8(12):2408–2424. PMID: 32607319 <https://doi.org/10.12998/wjcc.v8.i12.2408>
4. Tuinman PR, Jonkman AH, Dres M, Shi ZH, Goligher EC, Goffi A, et al. Respiratory muscle ultrasonography: methodology, basic and advanced principles and clinical applications in ICU and ED patients—a narrative review. *Intensive Care Med*. 2020;46(4):594–605. PMID: 31938825 <https://doi.org/10.1007/s00134-019-05892-8>
5. Vetrugno L, Guadagnin GM, Barbariol F, Langiano N, Zangrillo A, Bove T. Ultrasound Imaging for Diaphragm Dysfunction: A Narrative Literature Review. *Journal of Cardiothoracic and Vascular Anesthesia*. 2019;33(9):2525–2536. PMID: 30686657 <https://doi.org/10.1053/j.jvca.2019.01.003>
6. Miskin M. B-Mode Ultrasonographic Study of Diaphragmatic Motion. In: White D, ed. *Ultrasound in Medicine*. Springer US; 1975:169–176. [https://doi.org/10.1007/978-1-4613-4443-8\\_49](https://doi.org/10.1007/978-1-4613-4443-8_49)
7. Haber K, Asher WM, Freimanis AK. Echographic Evaluation of Diaphragmatic Motion in Intra-abdominal Diseases. *Radiology*. 1975;114(1):141–144. PMID: 1208854 <https://doi.org/10.1148/114.1.141>
8. Wait JL, Nahormek PA, Yost WT, Rochester DP. Diaphragmatic thickness-lung volume relationship in vivo. *Journal of Applied Physiology*. 1989;67(4):1560–1568. PMID: 2676955 <https://doi.org/10.1152/jappl.1989.67.4.1560>
9. Ueki J, De Bruin PF, Pride NB. In vivo assessment of diaphragm contraction by ultrasound in normal subjects. *Thorax*. 1995;50(11):1157–1161. PMID: 8553271 <https://doi.org/10.1136/thx.50.11.1157>
10. Houston JG, Angus RM, Cowan MD, McMillan NC, Thomson NC. Ultrasound assessment of normal hemidiaphragmatic movement: relation to inspiratory volume. *Thorax*. 1994;49(5):500–503. PMID: 8016774 <https://doi.org/10.1136/thx.49.5.500>
11. Shabaev VS, Orazmagomedova IV, Mazurok VA, Berezina AV, Vasilyeva LG, Aleksandrova DA. Sonography indicators of diaphragm in healthy individuals. *Russian Journal of Anesthesiology and Reanimatology*. 2023;(2):44–50. <https://doi.org/10.17116/anaesthesiology202302144>
12. Boussuges A, Gole Y, Blanc P. Diaphragmatic Motion Studied by M-Mode Ultrasonography. *Chest*. 2009;135(2):391–400. PMID: 19017880 <https://doi.org/10.1378/chest.08-1541>
13. Testa A, Soldati G, Giannuzzi R, Berardi S, Portale G, Gentiloni Silveri N. Ultrasound M-Mode Assessment of Diaphragmatic Kinetics by Anterior Transverse Scanning in Healthy Subjects. *Ultrasound in Medicine & Biology*. 2011;37(1):44–52. PMID: 21144957 <https://doi.org/10.1016/j.ultrasmedbio.2010.10.004>
14. Scott S, Fuld JP, Carter R, McEntegart M, MacFarlane NG. Diaphragm Ultrasonography as an Alternative to Whole-Body Plethysmography in Pulmonary Function Testing. *Journal of Ultrasound in Medicine*. 2006;25(2):225–232. PMID: 16439786 <https://doi.org/10.7863/jum.2006.25.2.225>
15. Skaarup SH, Juhl-Olsen P, Grundahl AS, Løgstrup BB. Replacement of fluoroscopy by ultrasonography in the evaluation of hemidiaphragm function, an exploratory prospective study. *Ultrasound J*. 2024;16(1):1. PMID: 38189895 <https://doi.org/10.1186/s13089-023-00355-0>
16. Lerolle N, Guérot E, Dimassi S, Zegdi R, Faisy C, Fagon JY, et al. Ultrasonographic Diagnostic Criterion for Severe Diaphragmatic Dysfunction After Cardiac Surgery. *Chest*. 2009;135(2):401–407. PMID: 18753469 <https://doi.org/10.1378/chest.08-1531>
17. Baldwin CE, Paratz JD, Bersten AD. Diaphragm and peripheral muscle thickness on ultrasound: Intra-rater reliability and variability of a methodology using non-standard recumbent positions. *Respirology*. 2011;16(7):1136–1143. PMID: 21645172 <https://doi.org/10.1111/j.1440-1843.2011.02005.x>
18. Hellyer NJ, Andreas NM, Bernstetter AS, Cieslak KR, Donahue GF, Steiner EA, et al. Comparison of Diaphragm Thickness Measurements Among Postures Via Ultrasound Imaging. *PM&R*. 2017;9(1):21–25. PMID: 27297447 <https://doi.org/10.1016/j.pmrj.2016.06.001>
19. Carrillo-Esper R, Pérez-Calatayud AA, Arch-Tirado E, Díaz-Carrillo MA, Garrido-Aguirre E, Tapia-Velazco R, et al. Standardization of Sonographic Diaphragm Thickness Evaluations in Healthy Volunteers. *Respir Care*. 2016;61(7):920–924. PMID: 27072012 <https://doi.org/10.4187/respcare.03999>
20. Seok JI, Kim SY, Walker FO, Kwak SG, Kwon DH. Ultrasonographic findings of the normal diaphragm: thickness and contractility. *Ann Clin Neurophysiol*. 2017;19(2):131. <https://doi.org/10.14253/acn.2017.19.2.131>
21. Boussuges A, Rives S, Finance J, Chaumet G, Vallée N, Risso JJ, et al. Ultrasound Assessment of Diaphragm Thickness and Thickening: Reference Values and Limits of Normality When in a Seated Position. *Front Med*. 2021;8:742703. PMID: 34778304 <https://doi.org/10.3389/fmed.2021.742703>
22. Van Doorn JLM, Wijntjes J, Saris CGJ, Ottenheim CAC, Van Alfen N, Doorduyn J. Association of diaphragm thickness and echogenicity with age, sex, and body mass index in healthy subjects. *Muscle and Nerve*. 2022;66(2):197–202. PMID: 35583147 <https://doi.org/10.1002/mus.27639>
23. Haaksma ME, Van Tienhoven AJ, Smit JM, Heldeweg MLA, Lissenberg-Witte BI, Wennen M, et al. Anatomical Variation in Diaphragm Thickness Assessed with Ultrasound in Healthy Volunteers. *Ultrasound in Medicine & Biology*. 2022;48(9):1833–1839. PMID: 35691733 <https://doi.org/10.1016/j.ultrasmedbio.2022.05.008>

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

- Евграфов Павел Геннадьевич** младший научный сотрудник отделения лучевой диагностики ГБУЗ «НИИ СП им. Н.В. Склифосовского ДЗМ»;  
<https://orcid.org/0000-0003-2713-3498>, [gembov@gmail.com](mailto:gembov@gmail.com);  
 40%: разработка концепции работы, проведение исследований, статистический анализ полученных данных, подготовка текста статьи
- Хамидова Лайла Тимарбековна** доктор медицинских наук, заведующая научным отделением лучевой диагностики ГБУЗ «НИИ СП им. Н.В. Склифосовского ДЗМ»;  
<https://orcid.org/0000-0002-9669-9164>, [layla72@mail.ru](mailto:layla72@mail.ru);  
 30%: концепция работы, проведение исследований, редактирование статьи
- Петриков Сергей Сергеевич** член-корреспондент РАН, профессор, доктор медицинских наук, директор ГБУЗ «НИИ СП им. Н.В. Склифосовского ДЗМ»;  
<https://orcid.org/0000-0003-3292-8789>, [petrikovss@sklif.mos.ru](mailto:petrikovss@sklif.mos.ru);  
 30%: концепция работы, управление проектом, редактирование статьи

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

## Ultrasound Assessment of Diaphragmatic Function: Methodology, Normative Values

P.G. Evgrafov✉, L.T. Khamidova, S.S. Petrikov

Department of Diagnostic Radiology  
 N.V. Sklifosovsky Research Institute for Emergency Medicine  
 Bolshaya Sukharevskaya Sq. 3, Moscow, Russian Federation 129090

✉ **Contacts:** Pavel G. Evgrafov, Junior Researcher, Department of Diagnostic Radiology, N.V. Sklifosovsky Research Institute for Emergency Medicine. Email: [gembov@gmail.com](mailto:gembov@gmail.com)

**RELEVANCE** Diaphragmatic dysfunction (DD) is common in critically ill patients, and is often the cause of respiratory failure requiring respiratory support. A generally accepted method for noninvasive dynamic evaluation of diaphragm function has not yet been proposed.

**THE AIM OF STUDY** To develop a method for ultrasound examination of diaphragm mobility and relative thickening, to propose standard parameters of diaphragm excursion and relative thickening depending on gender and age.

**MATERIAL AND METHODS** In 81 healthy volunteers aged 25 to 84 years (mean age 55±15 years), we used ultrasound to determine the thickness of the diaphragm on the right and left at the attachment site of the muscular part on end-expiration, tidal and forced inspiration; to calculate the fractional thickening (FT), diaphragm excursion during quiet and maximum inspiration, as well as indices of functional reserve by thickening (IFR(t)) and by diaphragm excursion (IFR(e)). We traced the dependence of the determined parameters on the age, gender, height, body mass index (BMI) and body surface area (BSA) of the subjects. To assess interobserver reproducibility, we calculated the limits of agreement and the intraclass correlation coefficient of the ultrasound parameters of the diaphragm function.

**RESULTS** The excursion of the diaphragm in women is smaller than in men, and statistically significantly decreases with age. A direct relationship between the thickness of the diaphragm on exhalation and the BSA was demonstrated. The FT during quiet inspiration on the left slightly but statistically significantly decreases with increasing BMI. The IFR(t) on the right slightly but statistically significantly decreases with age. The lower limits of the reference intervals for IFR(e) and IFR(t) do not depend on the factors considered and are the same for the right and left halves of the diaphragm. Inter-study reproducibility of ultrasound indices of diaphragm function is high: intra-class correlation coefficients for various parameters ranged from 0.81 to 0.96, measurement error according to the results of Bland-Altman analysis was small relative to the measured values.

**CONCLUSION** A method for ultrasound examination of diaphragm function is proposed. High inter-study reproducibility of the considered ultrasound parameters was confirmed, reference intervals were proposed. Functional reserve indices do not depend on age, gender and constitutional characteristics of the subjects.

**Keywords:** diaphragm ultrasound, diaphragm dysfunction, thickening fraction, diaphragm functional reserve index

**For citation** Evgrafov PG, Khamidova LT, Petrikov SS. Ultrasound Assessment of Diaphragmatic Function: Methodology, Normative Values. *Russian Sklifosovsky Journal of Emergency Medical Care*. 2025;14(1):37–46. <https://doi.org/10.23934/2223-9022-2025-14-1-37-46> (in Russ.)

**Conflict of interest** Authors declare lack of the conflicts of interests

**Acknowledgments, sponsorship** The study had no sponsorship

### Affiliations

- Pavel G. Evgrafov Junior Researcher, Department of Diagnostic Radiology, N.V. Sklifosovsky Research Institute for Emergency Medicine;  
<https://orcid.org/0000-0003-2713-3498>, [gembov@gmail.com](mailto:gembov@gmail.com);  
 40%, concept of study, performing examination, data analysis, text writing
- Laila T. Khamidova Doctor of Medical Sciences, Head, Department of Diagnostic Radiology, N.V. Sklifosovsky Research Institute for Emergency Medicine;  
<https://orcid.org/0000-0002-9669-9164>, [layla72@mail.ru](mailto:layla72@mail.ru);  
 30%, the concept of study, performing examination, article editing
- Sergey S. Petrikov Corresponding Member of the RAS, Full Professor, Doctor of Medical Sciences, Director, N.V. Sklifosovsky Research Institute for Emergency Medicine;  
<https://orcid.org/0000-0003-3292-8789>, [petrikovss@sklif.mos.ru](mailto:petrikovss@sklif.mos.ru);  
 30%, concept of study, project management, article editing

Received on 29.11.2024

Review completed on 12.12.2024

Accepted on 24.12.2024

Поступила в редакцию 29.11.2024

Рецензирование завершено 12.12.2024

Принята к печати 24.12.2024