



Ультразвуковое исследование в оценке функционального состояния диафрагмы у больных с дыхательной недостаточностью, требующей респираторной поддержки

П. Г. ЕВГРАФОВ, Л. Т. ХАМИДОВА, С. С. ПЕТРИКОВ, В. В. КУЛАБУХОВ

Научно-исследовательский институт скорой помощи имени Н. В. Склифосовского Департамента здравоохранения г. Москвы, Москва, РФ

РЕЗЮМЕ

Дисфункция диафрагмы (ДД) встречается у 60% пациентов через 24 часа после интубации. Ультразвуковое исследование (УЗИ) диафрагмы – метод, позволяющий неинвазивно оценить экскурсию и толщину диафрагмы в разные фазы дыхательного цикла. Экскурсия и фракция утолщения (ФУ) диафрагмы, измеренные по данным УЗИ, умеренно коррелируют с показателями методов «золотого стандарта». Как уменьшение, так и увеличение толщины диафрагмы в динамике у пациентов, находящихся на искусственной вентиляции легких (ИВЛ), ассоциировано с увеличением продолжительности пребывания пациентов на ИВЛ. Значение ФУ диафрагмы свыше 25% ассоциировано с успешным отлучением пациентов от ИВЛ. Поддержание ФУ диафрагмы на уровне 15–40% в режиме ИВЛ с поддержкой давлением ассоциировано с наименьшей продолжительностью ИВЛ.

Ключевые слова: ультразвуковое исследование диафрагмы, дисфункция диафрагмы, экстубация

Для цитирования: Евграфов П. Г., Хамидова Л. Т., Петриков С. С., Кулабухов В. В. Ультразвуковое исследование в оценке функционального состояния диафрагмы у больных с дыхательной недостаточностью, требующей респираторной поддержки // Вестник анестезиологии и реаниматологии. – 2024. – Т. 21, № 3. – С. 76–86. DOI: 10.24884/2078-5658-2024-21-3-76-86.

Ultrasound examination in assessing the functional state of the diaphragm in patients with respiratory failure requiring respiratory support

P. G. EVGRAFOV, L. T. HAMIDOVA, S. S. PETRIKOV, V. V. KULABUKHOV

N. V. Sklifosovsky Research Institute for Emergency Medicine, Moscow, Russia

ABSTRACT

Diaphragm dysfunction (DD) is diagnosed in 60% patients 24 hours after intubation. Diaphragm ultrasound (DU) facilitates non-invasive assessment of excursion and thickness of the diaphragm throughout the breathing cycle. Sonographically measured excursion and thickening fraction (TF) of the diaphragm show moderate correlation with reference methods for diaphragm dysfunction detection. Both increase and decrease in diaphragm thickness in mechanically ventilated patients are associated with prolonged mechanical ventilation. TF exceeding 25% increases probability of successful weaning. Maintaining TF within 15–40 % might shorten the duration of mechanical ventilation.

Key words: diaphragm ultrasound, diaphragm dysfunction, extubation

For citation: Evgrafov P. G., Hamidova L. T., Petrikov S. S., Kulabukhov V. V. Ultrasound examination in assessing the functional state of the diaphragm in patients with respiratory failure requiring respiratory support. *Messenger of Anesthesiology and Resuscitation*, 2024, Vol. 21, № 3, P. 76–86. (In Russ.) DOI: 10.24884/2078-5658-2024-21-3-76-86.

Для корреспонденции:
Павел Геннадьевич Евграфов
E-mail: gembov@gmail.com

Correspondence:
Pavel G. Evgrafov
E-mail: gembov@gmail.com

Введение

К развитию дисфункции диафрагмы (ДД) могут привести травматические, медикаментозные, инфекционные и метаболические факторы (табл. 1). В 5% случаев достоверно определить причину дисфункции диафрагмы не удается.

Для пациентов ОРИТ описано так называемое *вентилятор-индуцированное повреждение диафрагмы*, связанное с проведением пациенту искусственной вентиляции легких (ИВЛ). Показано, что до 60% пациентов уже в первые 24 часа от момента интубации имеют признаки нарушения сократительной способности диафрагмы [13].

Морфологическая картина атрофии мышечных волокон диафрагмы у пациентов, длительно находящихся на ИВЛ, впервые описана в 2008 г. S. Levine et al. было показано, что комбинация полного нейромышечного блока и ИВЛ в течение 18–69 часов приводила к выраженной атрофии мышечных волокон m. phrenicus [31].

По понятным причинам прямое измерение работоспособности мышечной части диафрагмы *in vivo* у человека невозможно. Поэтому для оценки функции диафрагмы предложены другие методы регистрации сократительной способности – измерение трансдиафрагмального давления (ΔP_{di}), измерение отрицательного давления в эндотрахеальной трубке при магнитной стимуляции диафрагмальных нервов ($P_{tr\ stim}$), электромиография диафрагмы [22, 33, 17]. Несмотря на высокий уровень стандартизации и воспроизводимости перечисленных методик и наличие количественных критериев нарушения функции диафрагмы, для всех этих модальностей характерна малая доступность и высокая трудоемкость проведения измерений.

Экскурсия диафрагмы как критерий дисфункции: ультразвуковая визуализация

Технически при ультразвуковом исследовании (УЗИ) наиболее просто оценить дыхательную

Таблица 1. Основные причины одно- и двусторонней дисфункции диафрагмы у пациентов отделения реанимации и интенсивной терапии (ОРИТ) [46]

Table 1. The main causes of uni- and bilateral diaphragm dysfunction in patients of intensive care unit [46]

<i>Односторонняя дисфункция</i>	
Травматическое повреждение (в том числе ятрогенное)	Кардиохирургические вмешательства
	Оперативные вмешательства на органах шеи
	Трансплантация легких, печени
	Осложненная катетеризация центральных вен, блокада плечевого сплетения в межлестничном промежутке
Дисфункция, вызванная компрессией диафрагмального нерва	Объемные образования средостения, легких
	Зоб (в том числе загрудинный)
	Напряженный пневмоторакс
	Массивный плевральный выпот
Нейроинфекции и неврологические осложнения инфекционных заболеваний	Вирусные инфекции
Неврологические заболевания и синдромы	ОНМК
	Рассеянный склероз
	ХВДП
	Синдром Персона-Тернера
	Состояние после ризотомии
<i>Двусторонняя дисфункция</i>	
Неврологические заболевания и синдромы	Рассеянный склероз
	Боковой амиотрофический склероз
	Синдром Гийена-Барре
	ХВДП
	Болезнь Шарко-Мари-Тута
	Синдром Кеннеди
	Полиомиелит
Миопатии и дистрофии	Полимиозит, дерматомиозит
Заболевания соединительной ткани	Системная красная волчанка
Электролитные нарушения	Гипокальциемия, гипофосфатемия, гипомагниемия
Эндокринные нарушения	Гипо- и гипертиреоз
Нарушение баланса давления в грудной и брюшной полости	ХОБЛ, бронхиальная астма
	Интраабдоминальная гипертензия, абдоминальный компартмент-синдром
Медикаментозное воздействие	Кортикостероиды
	Миорелаксанты
<i>Сепсис-индуцированная дисфункция</i>	
<i>Вентилятор-индуцированная дисфункция</i>	
Прочие причины	Вирусные инфекции
	Амилоидоз
	Порфирия

Примечание: ОНМК – острое нарушение мозгового кровообращения; ХВДП – хроническая воспалительная демиелинизирующая полинейропатия; ХОБЛ – хроническая обструктивная болезнь легких.

экскурсию диафрагмы. Впервые неинвазивное определение экскурсии диафрагмы ультразвуковым методом выполнено в 1975 г. [25]. Для этого необходим конвексный датчик частотой 3,5–5 МГц. Датчик располагают по правой средне-ключичной линии под реберной дугой, курсор М-режима ориентируют к задней трети соответствующего купола диафрагмы, добиваясь угла, наиболее близкого к 90 градусам. Возможно исследование как при спокойном дыхании, так и при максимальном вдохе (определение максимальной экскурсии диафраг-

мы). Исследование выполняют с подъемом головного конца кровати на 10–90 градусов (в зависимости от разновидности используемой методики) [46, 6, 40]. Визуализация левого купола диафрагмы в ряде случаев связана с техническими сложностями у 5–20% обследуемых пациентов [1, 40]. Для таких случаев N. Lerolle et al. (2009) предложили визуализировать купол диафрагмы по средней подмышечной линии, располагая датчик перпендикулярно грудной клетке практически во фронтальной плоскости [30] (рис. 1, 2).

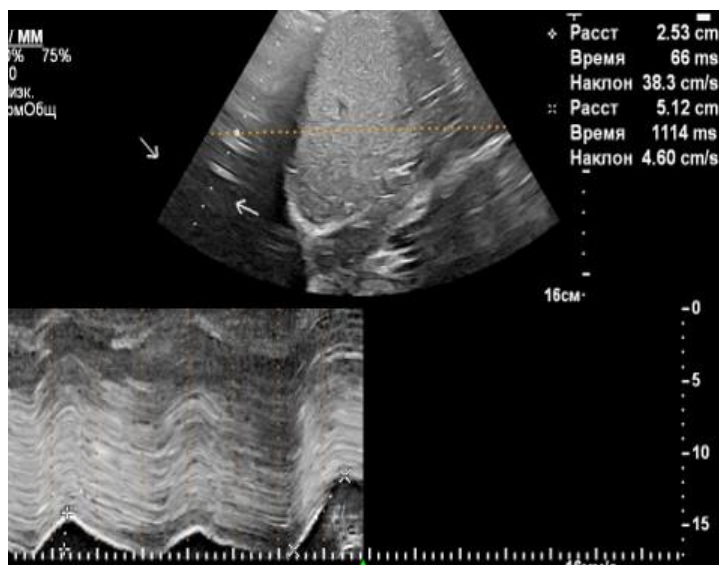


Рис. 1. Ультразвуковая визуализация экскурсии диафрагмы. Экскурсия при спокойном вдохе составила 2,5 см, при максимальном – 5,1 см

Fig. 1. Ultrasonic visualisation of diaphragm excursion. Excursion during quiet breathing is 2.5 cm, during maximal inspiration – 5.1 cm



Рис. 2. Расположение датчика по средней подмышечной линии при ультразвуковой оценке экскурсии и относительного утолщения диафрагмы

Fig. 2. Ultrasonic visualization of the excursion and relative thickness of the diaphragm: probe position along the mid-axillary line

Нормальные значения экскурсии диафрагмы при измерении из субкостального доступа в М-режиме на спокойном дыхании справа в положении сидя составляют 18 ± 4 мм, при глубоком вдохе – до 75 ± 9 мм (не менее 25 мм), у женщин зафиксированы несколько меньшие значения при глубоком вдохе [6, 10, 46]. По другим данным, максимальная экскурсия диафрагмы не зависит от пола, что может быть связано с отличиями выборок по индексу массы тела и по возрасту [40]. Существует умеренная корреляционная взаимосвязь между трансдиафрагмальным давлением и максимальной экскурсией диафрагмы [10, 30].

Наиболее очевидной точкой применения УЗИ экскурсии диафрагмы является диагностика одностороннего паралича диафрагмы. В этом случае на стороне поражения экскурсия диафрагмы составляет менее 4 мм либо фиксируется парадоксальное краниальное смещение соответствующего купола диафрагмы под действием отрицательного внутригрудного давления с каудальным смещением в исходное положение в конце вдоха [5].

У больных, которым проводят ИВЛ, не представляется возможным дифференцировать смещение диафрагмы, связанное с ее сократительной активностью, и пассивное смещение под действием создаваемого аппаратом положительного давления в дыхательных путях, в связи с чем измерение экскурсии диафрагмы у них мало информативно [46].

Исследование экскурсии диафрагмы возможно проводить как при спокойном, так и при форсированном вдохе, что в ряде случаев позволяет получить дополнительную информацию о функциональном состоянии диафрагмы. Так, в исследованиях В. С. Шабаева и др. (2023) показано, что у пациентов с хронической сердечной недостаточностью

с увеличением тяжести последней максимальная экскурсия остается относительно постоянной, а экскурсия в покое растет. По мнению авторов, это связано с тем, что, с одной стороны, уменьшение эластической податливости легочной ткани из-за изменения свойств интерстициальной ткани легких ведет к увеличению работы диафрагмы по достижению необходимого дыхательного объема в покое, с другой стороны, нарушение водно-электролитного баланса при хронической сердечной недостаточности сопровождается интерстициальным отеком m. phrenicus и серозного покрова диафрагмы [1, 2].

Ультразвуковое исследование диафрагмы при травме груди обладает высокой специфичностью, но низкой чувствительностью в отношении выявления разрыва диафрагмы, а также позволяет отслеживать восстановление экскурсии диафрагмы на фоне купирования болевого синдрома при переломах ребер за счет лечебных блокад межреберных нервов [4].

Толщина диафрагмы в разные фазы дыхательного цикла: методы измерения, нормативы, характерные изменения у реанимационных больных

Технические возможности современных ультразвуковых приборов позволяют у большинства пациентов визуализировать зону прикрепления диафрагмы и оценить ее толщину [11, 46]. Методика измерения толщины диафрагмы с помощью диагностического ультразвука в М-режиме впервые описана в 1989 г., с помощью В-режима – в 1995 г. [42]. Строго говоря, существует ряд методик определения толщины диафрагмы, в том числе с использованием низкочастотных датчиков. Метод

дики отличаются положением пациента (лежа или полусидя, сидя), расположением сканирующей поверхности датчика относительно топографических линий грудной клетки и осей тела (вдоль межреберий, во фронтальной плоскости, перпендикулярно грудной клетке). При использовании любой методики визуализацию осуществляют с боковой поверхности грудной клетки (подмышечные линии) в продольной оси, в проекции 8–10 межреберий (зона прикрепления мышечной части диафрагмы в норме). Визуализация по средней подмышечной линии позволяет добиться большей воспроизводимости измерений, чем при расположении датчика по средне-ключичной линии [24]. В качестве акустического окна используют правую долю печени (справа) или паренхиму селезенки (слева) (рис. 3). Во избежание погрешностей повторные измерения рекомендовано выполнять в том же межреберье при аналогичном положении пациента и датчика.

Нормативные значения толщины диафрагмы в норме зависят от пола (у мужчин наблюдают большие значения) и индекса массы тела [27]. Воспроизводимость измерений для левой половины диафрагмы достоверно ниже, в связи с чем в большинстве исследований, посвященных диагностической ценности УЗИ диафрагмы, измерения проводят только справа [17, 19, 35].

Измерение толщины диафрагмы необходимо выполнять, имея представление о разрешающей способности датчика. Минимальная разрешающая способность датчика в направлении распространения ультразвуковых волн составляет $1/4$ длины волны, излучаемой датчиком. Так, для датчика с рабочей частотой 10 МГц минимальная абсолютная погрешность измерения составляет порядка 0,15 мм, что с учетом средних нормативных значений толщины диафрагмы у взрослых (порядка 2,0–2,3 мм) соответствует относительной погрешности 5–8% от измеренной толщины. Изменения толщины диафрагмы, не превышающие 0,1–0,2 мм, таким образом, следует рассматривать как пренебрежимо малые [41].

Измеренная посредством УЗИ толщина диафрагмы зависит от положения пациента: значения максимальны при вертикальном положении туловища, минимальны – при горизонтальном [26]. Толщина диафрагмы в конце выдоха составляет $0,179 \pm 0,028$ см, на максимальном вдохе – не менее 0,29 см [11, 26].

Измерение максимальной толщины диафрагмы не может считаться полноценной альтернативой методу «золотого стандарта» – измерению трансдиафрагмального давления [39]. Изменение толщины диафрагмы в динамике (как маркер атрофии диафрагмы) являлось предметом ряда клинических исследований (табл. 2).

Результаты большинства исследований не противоречат друг другу; лишь при измерении толщины по передней подмышечной линии не прослеживается отчетливая динамика, что может объясняться меньшей воспроизводимостью получаемых значений, нежели при измерении по средней подмышечной



Рис. 3. Ультразвуковое измерение толщины диафрагмы
Fig. 3. Ultrasonic measurement of diaphragm thickness

шечной линии [24]. Утолщение диафрагмы у части пациентов, которым длительно проводят ИВЛ, как ранее предполагали, может быть связано с нарушением водно-электролитного обмена и интерстициальным отеком m. phrenicus, однако достоверных отличий по показателям водно-электролитного баланса среди пациентов с разнонаправленным изменением толщины диафрагмы в динамике при регрессионном анализе обнаружено не было [23, 49]. Дополнительным фактором, определяющим толщину диафрагмы, выступает наличие хронической сердечной недостаточности. Продemonстрировано увеличение толщины диафрагмы в покое у пациентов с ростом функционального класса хронической сердечной недостаточности по NYHA [1].

Относительное утолщение диафрагмы: методы определения, воспроизводимость

Помимо абсолютного значения толщины диафрагмы на вдохе и на выдохе оказалось целесообразным определять относительное увеличение толщины на вдохе у конкретного пациента: фракция утолщения диафрагмы (ФУ) = (толщина на вдохе – толщина на выдохе) / толщина на выдохе [46].

Измерение ФУ возможно как с использованием В-режима, так и в М-режиме. Измерение фракции утолщения обладает тремя преимуществами. Во-первых, относительный показатель менее подвержен внутри-исследовательской изменчивости, поскольку оба значения толщины измеряются из одного доступа в одном положении пациента. Воспроизводимость измерений ФУ по меньшей мере не уступает таковой для экскурсии диафрагмы и толщины, а по данным отдельных исследований – заметно ее превосходит (табл. 3). Воспроизводимость для измерений в М-режиме, как правило, несколько выше, особенно для операторов с небольшим опытом, что связано, по-видимому, с большей технической простотой измерений в М-режиме [9].

Во-вторых, ФУ более, нежели толщина диафрагмы, отражает функциональное состояние органа.

Таблица 2. Клинические исследования, посвященные изменению толщины диафрагмы по данным УЗИ в динамике у пациентов на ИВЛ**Table 2. Clinical studies on changes of diaphragm thickness measured with ultrasound in mechanically ventilated patients**

Автор (год)	n	Основные выводы
E. C. Goligher (2015) [21]	107	Для пациентов, которым проводят ИВЛ, изменение толщины диафрагмы типично и, возможно, ассоциировано с дисфункцией диафрагмы. За первую неделю проведения ИВЛ толщина уменьшилась у 44% пациентов, не изменилась у 44%, увеличилась более чем на 10% у 12% пациентов. У больных со спонтанным дыханием толщина диафрагмы не менялась
E. C. Goligher (2018) [19]	191	Как уменьшение, так и увеличение толщины диафрагмы более 10% от исходного значения в покое у пациентов, находящихся на ИВЛ, ассоциировано с увеличением продолжительности ИВЛ
T. Schepens (2015) [38]	54	Атрофия диафрагмы проявляется вскоре после начала ИВЛ, и ее можно с достаточной точностью фиксировать и мониторировать с помощью УЗИ. Средняя изначальная толщина составила 1,9 мм, а среднее минимальное значение среди исследованных пациентов – 1,3 мм, что соответствует относительному уменьшению толщины на 32%. Длительность ИВЛ коррелировала со степенью атрофии диафрагмы
M. Zambon (2016) [49]	40	Существует линейная взаимосвязь между респираторной поддержкой и скоростью развития атрофии диафрагмы. Скорость изменения толщины диафрагмы составляла от – 7,5% в сутки при ИВЛ до +2,3% при спонтанном дыхании
A. Grassi (2020) [23]	62	Уменьшение толщины диафрагмы в конце выдоха на 10% и более ассоциировано с увеличенной продолжительностью ИВЛ. Восстановление толщины диафрагмы после перехода на вспомогательный режим ИВЛ не коррелирует с исходом лечения

По одним сведениям, ФУ отражает собственную сократительную способность диафрагмы: фракция утолщения диафрагмы статистически значимо уменьшается с ростом давления поддержки и площади под кривой зависимости трансдиафрагмального давления от времени, что косвенно свидетельствует о том, что существует сильная корреляционная связь между ФУ и работой диафрагмы [48]. Аналогичная зависимость подтверждена у интубированных пациентов, вентилируемых в режиме PSV и при сравнении со здоровыми добровольцами и пациентами на ИВЛ с миоплегией [22, 43]. В режиме ACV в первые сутки после интубации не наблюдается достоверной корреляции между фракцией утолщения диафрагмы и значением $P_{tr\ stim}$. Даже у пациентов, которым проводят ИВЛ в сочетании с медикаментозной миоплегией, наблюдают ненулевые значения ФУ диафрагмы, по-видимому, обусловленные пассивным каудальным смещением диафрагмы под действием положительного давления в дыхательных путях [17].

В-третьих, ФУ, в отличие от абсолютной толщины диафрагмы, значимо не зависит от положения тела исследуемого и лишь слабо коррелирует с возрастом [10, 26, 44]. Нормативные значения ФУ у здоровых добровольцев варьируют в широких пределах: справа 105% (28–258), слева 115% (17–213) [27]. Зависимость между трансдиафрагмальным давлением и ФУ диафрагмы у здоровых добровольцев статистически значимая, но при ИВЛ тенденция не достигает уровня статистической значимости [22, 36].

Ультразвуковое исследование диафрагмы у больных с пневмонией вирусной этиологии

Исследование экскурсии и ФУ диафрагмы у пациентов с коронавирусной инфекцией позволяет выявить признаки дисфункции диафрагмы как в процессе лечения, так и в периоде реабилитации, что может позволить дифференцировать первичную

дисфункцию диафрагмы от приобретенной и скорректировать лечебные и реабилитационные мероприятия [7]. Низкое значение толщины диафрагмы в покое (менее 2,2 мм) при поступлении является независимым предиктором неблагоприятного исхода (необходимость ИВЛ и/или смерть) [12]. Низкие значения ФУ могут служить дополнительным показанием к респираторной поддержке даже при нормальной сатурации гемоглобина кислородом, а высокие значения ФУ при переходе от принудительных режимов ИВЛ к поддержке давлением могут говорить о неготовности к отлучению от ИВЛ [45]. Показано, что при переходе к прона-позиции помимо улучшения насыщения гемоглобина кислородом происходит увеличение ФУ с 33 до 41%, однако риск необходимости перехода на ИВЛ с повышением ФУ диафрагмы возрастает независимо от использования прона-позиции при неинвазивной вентиляции легких (НИВЛ) [8]. При отлучении от ИВЛ пациентов с тяжелым поражением легких, обусловленным коронавирусной инфекцией, значение ФУ диафрагмы не позволяет спрогнозировать успешность отлучения от ИВЛ [47].

Ультразвуковые параметры диафрагмы в оценке эффективности НИВЛ и вспомогательных режимов вентиляции

Продemonстрировано, что снижение ФУ диафрагмы менее 37% в течение 96 часов от начала НИВЛ – предиктор необходимости инвазивной вентиляции легких, причем отношение частоты дыхательных движений к ФУ позволяет добиться еще большей прогностической точности [34]. У пациентов с декомпенсацией ХОБЛ фракция утолщения диафрагмы менее 20% перед началом НИВЛ ассоциирована с повышенным риском неэффективности НИВЛ и необходимости перехода к ИВЛ [29]. Напротив, экскурсия диафрагмы, по имеющимся данным, не является предиктором успешности НИВЛ [3].

Таблица 3. Воспроизводимость основных ультразвуковых параметров при УЗИ диафрагмы

Table 3. Reproducibility of main diaphragm function parameters measured with ultrasound

Автор, год	Внутриклассовый коэффициент корреляции (ICC)	Коэффициент воспроизводимости (абсолютное либо относительное значение)
<i>Толщина диафрагмы (в конце выдоха)</i>		
T. Schepens, 2015 [38]	–	Внутриисследовательская: 0,945
	–	Межисследовательская: 0,971
M. Umbrello, 2015 [43]	Внутриисследовательская (два оператора) 0,877 и 0,876	0,041 см и 0,039 см
	Межисследовательская: 0,989	0,023 см
M. Zambon, 2016 [49]	Внутриисследовательская: 0,98	–
	Межисследовательская: 0,97	–
G. Ferrari, 2014 [18]	Внутриисследовательская: 0,98	–
	Межисследовательская: 0,98	–
E. C. Goligher, 2015 [22]		Внутриисследовательская: 1,9 мм (слева) 0,4 мм (справа); 0,2 мм (справа при маркировке места повторных измерений)
		Межисследовательская : 1,4 мм (слева) 2,1 мм (справа); 0,4 справа при маркировке места повторных измерений)
A. Dhungana, 2017 [14]	Внутриисследовательская: 0,986	–
	Межисследовательская: 0,987	–
<i>Фракция утолщения диафрагмы, %</i>		
E. Vivier, 2012 [48]	Внутриисследовательская: 0,987	7,3%
	Межисследовательская: 0,985	7,9%
	Внутриисследовательская: 0,985	15,2%
	Межисследовательская: 0,978	17,8%
M. Umbrello, 2015 [43]	Внутриисследовательская: (два оператора) 0,986 и 0,990	10,6% и 8,9%
	Межисследовательская: 0,936	17,9%
E. C. Goligher, 2015 [22]	Внутриисследовательская:	13% (слева); 19% (справа); 17% (справа при маркировке места измерений)
	Межисследовательская:	39% (слева); 27% (справа); 16% (справа при маркировке места измерений)
I. Cappellini, 2021 [9]	Внутриисследовательская: В-режим 0,39–0,75 М-режим 0,69–0,83	Внутриисследовательская: В-режим 0,16–0,26 см М-режим 0,10–0,15 см
	Межисследовательская: В-режим 0,55–0,68 М-режим 0,72–0,78	Межисследовательская: В-режим 0,32–0,36 см М-режим 0,13–0,14 см
<i>Экскурсия диафрагмы</i>		
M. Umbrello, 2015 [43]	Внутриисследовательская: (2 оператора) 0,998 и 0,999	0,80 см и 0,68 см
	Межисследовательская: 0,988	0,256 см
W.Y. Kim, 2011 [28]	Внутриисследовательская: справа: 0,952, слева: 0,945	–

Ультразвуковые параметры диафрагмы в оценке готовности пациентов к отлучению от ИВЛ

За последние 25 лет проведено немало исследований эффективности различных ультразвуковых параметров в определении подгруппы пациентов с благоприятным прогнозом по отлучению от ИВЛ (табл. 4).

Наиболее информативным предиктором неуспешного отлучения пациента от ИВЛ, по данным большинства исследований, является снижение ФУ диафрагмы, что подтверждено данными метаанализа: оптимальное пограничное значение ФУ для

выявления риска неуспешной экстубации составляет 25%, чувствительность при этом составляет 96%, специфичность – 86%, отношение шансов – 239,3. В различных источниках для этой цели предложены пороговые значения ФУ от 20 до 36%. Экскурсия диафрагмы обладает гораздо более скромными показателями чувствительности и специфичности – 79,9% и 69%, соответственно [32]. При меньших значениях ФУ истончение диафрагмы происходит быстрее и ухудшается прогноз по успешной экстубации. Кроме того, по данным E. C. Goligher et al. (2018), увеличение абсолютной толщины диафрагмы по данным УЗИ у больных, которым проводят ИВЛ, не приводит к улучшению прогноза по экстубации, а, напротив,

Таблица 4. Ультразвуковые параметры как предикторы успешной экстубации у пациентов ОРИТ

Table 4. Ultrasound parameters as predictors of successful extubation in patients of intensive care unit

Автор (год)	Параметр	Стандарт сравнения	Основные результаты	Критерий высокого риска неуспешной экстубации	Информативность
W.Y. Kim [28] (2011)	Экскурсия, М-режим	RSBI	Экскурсия – предиктор неудачного отлучения от ИВЛ	Экскурсия <14 мм (справа) Экскурсия <12 мм (слева)	Чувствительность 60% Специфичность 76% AUC 0,68
E. Dinino (2014) [15]	Толщина диафрагмы и фракция утолщения	RSBI	ФУ позволяет предсказать успех или неуспех экстубации при тесте со спонтанным дыханием или поддержкой давления	ФУ < 30%	Чувствительность 88% Специфичность 71% AUC 0,79
G. Ferrari (2014) [18]	ФУ	RSBI	ФУ – предиктор успешной экстубации	ФУ < 36%	Чувствительность 82% Специфичность 88%
A. Marchioni (2018) [33]	ФУ	Трансдиафрагмальное давление на sniff-маневре	ФУ – независимый предиктор неуспешной экстубации	ФУ < 20%	AUC 0,84 в предсказании неудачного отлучения. Чувствительность 100%. Специфичность 100% в диагностике дисфункции диафрагмы
P. Pirompanich (2018) [35]	ФУ	RSBI	Совместное применение критериев RSBI менее 105 и ФУ справа не менее 26% позволило предсказывать успешную экстубацию	ФУ < 26%	Для совместного применения двух методов – Чувствительность 92%, Специфичность 77,8%
S. Samanta (2017) [37]	ФУ, экскурсия, скорость экскурсии	Нет	У пациентов на ИВЛ до теста с t-образной трубкой, еще на этапе поддержки давлением можно выделить группу пациентов с благоприятным прогнозом экстубации: – по ФУ – по подвижности – по скорости экскурсии	ФУ < 25,5% (триггер 2 см водн. ст.) Скорость < 1,24 см /с Подвижность < 1,2 см (все – на максимальном вдохе)	Наиболее информативен – ФУ AUC 0,91 Чувствительность 97% Специфичность 81%
E. C. Goligher (2018) [19]	Толщина диафрагмы – динамика в течение 1-й недели ИВЛ ФУ	Нет	Значения ФУ 15–30% и промежуточные значения толщины диафрагмы – наиболее благоприятный прогноз для экстубации с наименьшим числом осложнений	–	–
M. Dres (2020) [16]	ФУ диафрагмы	Ptr stim	ФУ межреберных мышц у здоровых добровольцев близка к нулю, у пациентов на ИВЛ ФУ межреберных мышц увеличивается с уменьшением ФУ диафрагмы	<28,7%	Чувствительность 95% Специфичность 72%
	ФУ межреберных мышц			>9,5%	Чувствительность 91% Специфичность 72%

Примечание: RSBI – Rapid Shallow Breathing Index, AUC – площадь под ROC-кривой, ФУ – фракция утолщения диафрагмы, Ptr stim – снижение давления в эндотрахеальной трубке в ответ на магнитную стимуляцию диафрагмальных нервов.

сопровождается тенденцией (статистически незначимой) к ухудшению функциональных исходов. Так, если в течение первой недели у пациента по данным УЗИ происходило снижение толщины диафрагмы на 10% и более, частота продолжительного проведения ИВЛ (3 недели и более) была выше (39% против 22%) при отсутствии статистически значимой разницы по риску смерти. Также при уменьшении абсолютной толщины диафрагмы по данным УЗИ наблюдали большую продолжительность ИВЛ в первые 60 суток наблюдения (от момента интубации), большие сроки нахождения в ОРИТ, больший риск реинтубации и трахеостомии (в 3,5 раза), однако статистически зна-

чимой зависимости между толщиной диафрагмы и вероятностью внутригоспитальной смерти и смерти в ОРИТ не наблюдали [19].

Концепция диафрагмопротективной искусственной вентиляции легких и ультразвуковое исследование диафрагмы

Сохранение собственной мышечной активности диафрагмы при вспомогательных режимах вентиляции способствует как предотвращению атрофии диафрагмы как таковой, так и улучшению аэрации задне-базальных отделов легких. Продемонстри-

ровано, что измерение относительного утолщения диафрагмы позволяет подобрать оптимальный уровень мышечной активности m. phrenicus, который позволяет, с одной стороны, избежать излишней нагрузки на мышцу, с другой стороны – избежать ее атрофии. При этом предложено ориентироваться в том числе на фракцию утолщения диафрагмы. При уровне ФУ 15–40%, при прочих равных условиях, зафиксированы наименьшие сроки нахождения пациентов на ИВЛ [19, 20].

Заключение

Ультразвуковое исследование диафрагмы – метод, позволяющий у большинства пациентов визуализи-

ровать диафрагму, оценить ее подвижность и сократительную способность, в том числе при проведении искусственной вентиляции легких. Ультразвуковые показатели функции диафрагмы характеризуются достаточной воспроизводимостью и демонстрируют умеренную корреляционную взаимосвязь с показателями, полученными при применении методов дефинитивной диагностики. Исследование экскурсии диафрагмы можно успешно применять для диагностики одностороннего и двустороннего паралича диафрагмы, а фракция утолщения диафрагмы может быть использована в качестве предиктора успешного отлучения пациента от ИВЛ. Контроль ФУ диафрагмы может позволить сократить сроки проведения пациенту ИВЛ.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии у них конфликта интересов.

Conflict of Interests. The authors state that they have no conflict of interests.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шабает В. С., Оразмагомедова И. В., Мазурок В. А. и др. Диафрагмальная дисфункция у пациентов с хронической сердечной недостаточностью // *Анестезиология и реаниматология*. – 2023. – № 5. – С. 44–51. DOI: 10.17116/anaesthesiology202305144.
2. Шабает В. С., Оразмагомедова И. В., Мазурок В. А. и др. Спирометрические и структурно-функциональные изменения работы аппарата внешнего дыхания у пациентов с хронической сердечной недостаточностью // *Общая реаниматология*. – 2023. – Т. 19, № 5. – С. 39–45. DOI: 10.15360/1813-9779-2023-5-2344.
3. Barbariol F., Deana C., Guadagnin G. M. et al. Ultrasound diaphragmatic excursion during non-invasive ventilation in ICU: a prospective observational study // *Acta Biomed*. – 2021. – Vol. 92, № 3. – P. e2021269. DOI: 10.23750/abm.v92i3.11609.
4. Bataille B., Nucci B., De Selle J. et al. Paravertebral block restore diaphragmatic motility measured by ultrasonography in patients with multiple rib fractures // *J Clin Anesth*. – 2017. – Vol. 42. – P. 55–56. DOI: 10.1016/j.jclinane.2017.08.019.
5. Boussuges A., Brégeon F., Blanc P. et al. Characteristics of the paralysed diaphragm studied by M-mode ultrasonography // *Clin Physiol Funct Imaging*. – 2019. – Vol. 39, № 2. – P. 143–149. DOI: 10.1111/cpf.12549.
6. Boussuges A., Gole Y., Blanc P. Diaphragmatic motion studied by M-mode ultrasonography: methods, reproducibility and normal values // *Chest*. – 2009. – Vol. 135, № 2. – P. 391–400. DOI: 10.1378/chest.08-1541.
7. Boussuges A., Habert P., Chaumet G. et al. Diaphragm dysfunction after severe COVID-19: An ultrasound study // *Front Med (Lausanne)*. – 2022. – Vol. 9. – P. 949281. DOI: 10.3389/fmed.2022.949281.
8. Cammarota G., Rossi E., Vitali L. et al. Effect of awake prone position on diaphragmatic thickening fraction in patients assisted by noninvasive ventilation for hypoxemic acute respiratory failure related to novel coronavirus disease // *Crit Care*. – 2021. – Vol. 25, № 1. – P. 305. DOI: 10.1186/s13054-021-03735-x.
9. Cappellini I., Picciafuochi F., Bartolucci M. et al. Evaluation of diaphragm thickening by diaphragm ultrasonography: a reproducibility and a repeatability study // *J Ultrasound*. – 2021. – Vol. 24, № 4. – P. 411–416. DOI: 10.1007/s40477-020-00462-x.
10. Cardenas L. Z., Santana P. V., Caruso P. et al. Diaphragmatic Ultrasound Correlates with Inspiratory Muscle Strength and Pulmonary Function in Healthy Subjects // *Ultrasound Med Biol*. – 2018. – Vol. 44, № 4. – P. 786–793. DOI: 10.1016/j.ultrasmedbio.2017.11.020.
11. Carrillo-Esper R., Pérez-Calatayud Á. A., Arch-Tirado E. Standardization of Sonographic Diaphragm Thickness Evaluations in Healthy Volunteers // *Respir Care*. – 2016. – Vol. 61, № 7. – P. 920–924. DOI: 10.4187/respcare.03999.
12. Corradi F., Isirdi A., Malacarne P. et al. Low diaphragm muscle mass predicts adverse outcome in patients hospitalized for COVID-19 pneumonia: an exploratory pilot study // *Minerva Anesthesiol*. – 2021. – Vol. 87, № 4. – P. 432–438. DOI: 10.23736/S0375-9393.21.15129-6.

REFERENCES

1. Shabaev V.S., Orazmagomedova I.V., Mazurok V.A. et al. Diaphragmatic dysfunction in patients with chronic heart failure. *Anesteziologiya i reanimatologiya*, 2023, no. 5, pp. 44–51. (In Russ.) DOI: 10.17116/anaesthesiology202305144.
2. Shabaev V.S., Orazmagomedova I.V., Mazurok V.A. et al. Morphological and functional alterations of respiratory muscle performance and spirometry parameters in patients with congestive heart failure. *Obshchaya reanimatologiya*, 2023, vol. 19, no. 5, pp. 39–45. (In Russ.) DOI: 10.15360/1813-9779-2023-5-2344.
3. Barbariol F., Deana C., Guadagnin G.M. et al. Ultrasound diaphragmatic excursion during non-invasive ventilation in ICU: a prospective observational study. *Acta Biomed*, 2021, vol. 92, no. 3, pp. e2021269. DOI: 10.23750/abm.v92i3.11609.
4. Bataille B., Nucci B., De Selle J. et al. Paravertebral block restore diaphragmatic motility measured by ultrasonography in patients with multiple rib fractures. *J Clin Anesth*, 2017, vol. 42, pp. 55–56. DOI: 10.1016/j.jclinane.2017.08.019.
5. Boussuges A., Brégeon F., Blanc P. et al. Characteristics of the paralysed diaphragm studied by M-mode ultrasonography. *Clin Physiol Funct Imaging*, 2019, vol. 39, no. 2, pp. 143–149. DOI: 10.1111/cpf.12549.
6. Boussuges A., Gole Y., Blanc P. Diaphragmatic motion studied by M-mode ultrasonography: methods, reproducibility and normal values. *Chest*, 2009, vol. 135, no. 2, pp. 391–400. DOI: 10.1378/chest.08-1541.
7. Boussuges A., Habert P., Chaumet G. et al. Diaphragm dysfunction after severe COVID-19: An ultrasound study. *Front Med (Lausanne)*, 2022, vol. 9, pp. 949281. DOI: 10.3389/fmed.2022.949281.
8. Cammarota G., Rossi E., Vitali L. et al. Effect of awake prone position on diaphragmatic thickening fraction in patients assisted by noninvasive ventilation for hypoxemic acute respiratory failure related to novel coronavirus disease. *Crit Care*, 2021, vol. 25, no. 1, pp. 305. DOI: 10.1186/s13054-021-03735-x.
9. Cappellini I., Picciafuochi F., Bartolucci M. et al. Evaluation of diaphragm thickening by diaphragm ultrasonography: a reproducibility and a repeatability study. *J Ultrasound*, 2021, vol. 24, no. 4, pp. 411–416. DOI: 10.1007/s40477-020-00462-x.
10. Cardenas L.Z., Santana P.V., Caruso P. et al. Diaphragmatic ultrasound correlates with inspiratory muscle strength and pulmonary function in healthy subjects. *Ultrasound Med Biol*, 2018, vol. 44, no. 4, pp. 786–793. DOI: 10.1016/j.ultrasmedbio.2017.11.020.
11. Carrillo-Esper R., Pérez-Calatayud Á. A., Arch-Tirado E. Standardization of sonographic diaphragm thickness evaluations in healthy volunteers. *Respir Care*, 2016, vol. 61, no. 7, pp. 920–924. DOI: 10.4187/respcare.03999.
12. Corradi F., Isirdi A., Malacarne P. et al. Low diaphragm muscle mass predicts adverse outcome in patients hospitalized for COVID-19 pneumonia: an exploratory pilot study. *Minerva Anesthesiol*, 2021, vol. 87, no. 4, pp. 432–438. DOI: 10.23736/S0375-9393.21.15129-6.

13. Demoule A., Jung B., Prodanovic H. et al. Diaphragm dysfunction on admission to the intensive care unit. Prevalence, risk factors, and prognostic impact – a prospective study // *Am J Respir Crit Care Med*. – 2013. – Vol. 188, № 2. – P. 213–219. DOI: 10.1164/rccm.201209-1668OC.
14. Dhungana A., Khilnani G., Hadda V. et al. Reproducibility of diaphragm thickness measurements by ultrasonography in patients on mechanical ventilation // *World J Crit Care Med*. – 2017. – Vol. 6, № 4. – P. 185–189. DOI: 10.5492/wjccm.v6.i4.185.
15. DiNino E., Gartman E. J., Sethi J. M. et al. Diaphragm ultrasound as a predictor of successful extubation from mechanical ventilation // *Thorax*. – 2014. – Vol. 69, № 5. – P. 431–435. DOI: 10.1136/thoraxjnl-2013-204111.
16. Dres M., Dubé B. P., Goligher E. Usefulness of parasternal intercostal muscle ultrasound during weaning from mechanical ventilation // *Anesthesiology*. – 2020. – Vol. 132, № 5. – P. 1114–1125. DOI: 10.1097/ALN.0000000000003191.
17. Dubé B.-P., Dres M., Mayaux J. et al. Ultrasound evaluation of diaphragm function in mechanically ventilated patients: comparison to phrenic stimulation and prognostic implications // *Thorax*. – 2017. – Vol. 72, № 9. – P. 811–818. DOI: 10.1136/thoraxjnl-2016-209459.
18. Ferrari G., De Filippi G., Elia F. et al. Diaphragm ultrasound as a new index of discontinuation from mechanical ventilation // *Crit Ultrasound J*. – 2014. – Vol. 6, № 1. – P. 8. DOI: 10.1186/2036-7902-6-8.
19. Goligher E. C., Dres M., Fan E. et al. Mechanical ventilation-induced diaphragm atrophy strongly impacts clinical outcomes // *Am J Respir Crit Care Med*. – 2018. – Vol. 197, № 2. – P. 204–213. DOI: 10.1164/rccm.201703-0536OC.
20. Goligher E. C., Dres M., Patel B. K. et al. Lung- and Diaphragm-Protective Ventilation // *Am J Respir Crit Care Med*. – 2020. – Vol. 202, № 7. – P. 950–961. DOI: 10.1164/rccm.202003-0655CP.
21. Goligher E. C., Fan E., Herridge M. S. et al. Evolution of diaphragm thickness during mechanical ventilation. impact of inspiratory effort // *Am J Respir Crit Care Med*. – 2015. – Vol. 192, № 9. – P. 1080–1088. DOI: 10.1164/rccm.201503-0620OC.
22. Goligher E. C., Laghi F., Detsky M. E. et al. Measuring diaphragm thickness with ultrasound in mechanically ventilated patients: feasibility, reproducibility and validity // *Intensive Care Med*. – 2015. – Vol. 41, № 4. – P. 642–649. DOI: 10.1007/s00134-015-3687-3.
23. Grassi A., Ferlicca D., Lupieri E. et al. Assisted mechanical ventilation promotes recovery of diaphragmatic thickness in critically ill patients: a prospective observational study // *Crit Care*. – 2020. – Vol. 24, № 1. – P. 85. DOI: 10.1186/s13054-020-2761-6.
24. Haaksma M. E., van Tienhoven A. J., Smit J. M. et al. Anatomical Variation in Diaphragm Thickness Assessed with Ultrasound in Healthy Volunteers // *Ultrasound Med Biol*. – 2022. – Vol. 48, № 9. – P. 1833–1839. DOI: 10.1016/j.ultrasmedbio.2022.05.008.
25. Haber K., Asher M., Freimanis A. K. Echographic evaluation of diaphragmatic motion in intra-abdominal diseases // *Radiology*. – 1975. – Vol. 114, № 1. – P. 141–144. DOI: 10.1148/114.1.141.
26. Hellyer N. J., Andreas N. M., Bernstetter A. S. et al. Comparison of diaphragm thickness measurements among postures via ultrasound imaging // *PM R. (Phys Med Rehab)*. – 2017. – Vol. 9, № 1. – P. 21–25. DOI: 10.1016/j.pmrj.2016.06.001.
27. Jung I. S., Shin Y. K., Walker O. F. et al. Ultrasonographic findings of the normal diaphragm: thickness and contractility // *Ann Clin Neurophysiol*. – 2017. – Vol. 19, № 2. – P. 131–135. DOI: 10.14253/acn.2017.19.2.131.
28. Kim W. Y., Suh H. J., Hong S.-B. et al. Diaphragm dysfunction assessed by ultrasonography: influence on weaning from mechanical ventilation // *Crit Care Med*. – 2011. – Vol. 39, № 12. – P. 2627–2630. DOI: 10.1097/CCM.0b013e3182266408.
29. Kocyigit H., Gunalp M., Genc S. et al. Diaphragm dysfunction detected with ultrasound to predict noninvasive mechanical ventilation failure: a prospective cohort study // *Am J Emerg Med*. – 2021. – Vol. 45. – P. 202–207. DOI: 10.1016/j.ajem.2020.08.014.
30. Lerolle N., Guerot E., Dimassi S. et al. Ultrasonographic diagnostic criterion for severe diaphragmatic dysfunction after cardiac surgery // *Chest*. – 2009. – Vol. 135, № 2. – P. 401–407. DOI: 10.1378/chest.08-1531.
31. Levine S., Nguyen T., Taylor N. et al. Rapid disuse atrophy of diaphragm fibers in mechanically ventilated humans // *N Engl J Med*. – 2008. – Vol. 358, № 13. – P. 1327–1335. DOI: 10.1056/NEJMoa07447.
32. Mahmoodpoor A., Fouladi S., Ramouz A. et al. Diaphragm ultrasound to predict weaning outcome: systematic review and meta-analysis // *Anaesthesiol Intensive Ther*. – 2022. – Vol. 54, № 2. – P. 164–174. DOI: 10.5114/ait.2022.117273.
33. 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. – Vol. 22, № 1. – P. 109. DOI: 10.1186/s13054-018-2033-x.
13. Demoule A., Jung B., Prodanovic H. et al. Diaphragm dysfunction on admission to the intensive care unit. Prevalence, risk factors, and prognostic impact – a prospective study. *Am J Respir Crit Care Med*, 2013, vol. 188, no. 2, pp. 213–219. DOI: 10.1164/rccm.201209-1668OC.
14. Dhungana A., Khilnani G., Hadda V. et al. Reproducibility of diaphragm thickness measurements by ultrasonography in patients on mechanical ventilation. *World J Crit Care Med*, 2017, vol. 6, no. 4, pp. 185–189. DOI: 10.5492/wjccm.v6.i4.185.
15. DiNino E., Gartman E.J., Sethi J.M. et al. Diaphragm ultrasound as a predictor of successful extubation from mechanical ventilation. *Thorax*, 2014, vol. 69, no. 5, pp. 431–435. DOI: 10.1136/thoraxjnl-2013-204111.
16. Dres M., Dubé B.P., Goligher E. Usefulness of parasternal intercostal muscle ultrasound during weaning from mechanical ventilation. *Anesthesiology*, 2020, vol. 132, no. 5, pp. 1114–1125. DOI: 10.1097/ALN.0000000000003191.
17. Dubé B.-P., Dres M., Mayaux J. et al. Ultrasound evaluation of diaphragm function in mechanically ventilated patients: comparison to phrenic stimulation and prognostic implications. *Thorax*, 2017, vol. 72, no. 9, pp. 811–818. DOI: 10.1136/thoraxjnl-2016-209459.
18. Ferrari G., De Filippi G., Elia F. et al. Diaphragm ultrasound as a new index of discontinuation from mechanical ventilation. *Crit Ultrasound J*, 2014, vol. 6, no. 1, pp. 8. DOI: 10.1186/2036-7902-6-8.
19. Goligher E.C., Dres M., Fan E. et al. Mechanical ventilation-induced diaphragm atrophy strongly impacts clinical outcomes. *Am J Respir Crit Care Med*, 2018, vol. 197, no. 2, pp. 204–213. DOI: 10.1164/rccm.201703-0536OC.
20. Goligher E.C., Dres M., Patel B.K. et al. Lung- and diaphragm-protective ventilation. *Am J Respir Crit Care Med*, 2020, vol. 202, no. 7, pp. 950–961. DOI: 10.1164/rccm.202003-0655CP.
21. Goligher E.C., Fan E., Herridge M.S. et al. Evolution of diaphragm thickness during mechanical ventilation. impact of inspiratory effort. *Am J Respir Crit Care Med*, 2015, vol. 192, no. 9, pp. 1080–1088. DOI: 10.1164/rccm.201503-0620OC.
22. Goligher E.C., Laghi F., Detsky M.E. et al. Measuring diaphragm thickness with ultrasound in mechanically ventilated patients: feasibility, reproducibility and validity. *Intensive Care Med*, 2015, vol. 41, no. 4, pp. 642–649. DOI: 10.1007/s00134-015-3687-3.
23. Grassi A., Ferlicca D., Lupieri E. et al. Assisted mechanical ventilation promotes recovery of diaphragmatic thickness in critically ill patients: a prospective observational study. *Crit Care*, 2020, vol. 24, no. 1, pp. 85. DOI: 10.1186/s13054-020-2761-6.
24. Haaksma M.E., van Tienhoven A.J., Smit J.M. et al. Anatomical Variation in diaphragm thickness assessed with ultrasound in healthy volunteers. *Ultrasound Med Biol*, 2022, vol. 48, no. 9, pp. 1833–1839. DOI: 10.1016/j.ultrasmedbio.2022.05.008.
25. Haber K., Asher M., Freimanis A.K. Echographic evaluation of diaphragmatic motion in intra-abdominal diseases. *Radiology*, 1975, vol. 114, no. 1, pp. 141–144. DOI: 10.1148/114.1.141.
26. Hellyer N.J., Andreas N.M., Bernstetter A.S. et al. Comparison of diaphragm thickness measurements among postures via ultrasound imaging. *PM R. (Phys Med Rehab)*, 2017, vol. 9, no. 1, pp. 21–25. DOI: 10.1016/j.pmrj.2016.06.001.
27. Jung I.S., Shin Y.K., Walker O.F. et al. Ultrasonographic findings of the normal diaphragm: thickness and contractility. *Ann Clin Neurophysiol*, 2017, vol. 19, no. 2, pp. 131–135. DOI: 10.14253/acn.2017.19.2.131.
28. Kim W.Y., Suh H.J., Hong S.-B. et al. Diaphragm dysfunction assessed by ultrasonography: influence on weaning from mechanical ventilation. *Crit Care Med*, 2011, vol. 39, no. 12, pp. 2627–2630. DOI: 10.1097/CCM.0b013e3182266408.
29. Kocyigit H., Gunalp M., Genc S. et al. Diaphragm dysfunction detected with ultrasound to predict noninvasive mechanical ventilation failure: a prospective cohort study. *Am J Emerg Med*, 2021, vol. 45, pp. 202–207. DOI: 10.1016/j.ajem.2020.08.014.
30. Lerolle N., Guerot E., Dimassi S. et al. Ultrasonographic diagnostic criterion for severe diaphragmatic dysfunction after cardiac surgery. *Chest*, 2009, vol. 135, no. 2, pp. 401–407. DOI: 10.1378/chest.08-1531.
31. Levine S., Nguyen T., Taylor N. et al. Rapid disuse atrophy of diaphragm fibers in mechanically ventilated humans. *N Engl J Med*, 2008, vol. 358, no. 13, pp. 1327–1335. DOI: 10.1056/NEJMoa07447.
32. Mahmoodpoor A., Fouladi S., Ramouz A. et al. Diaphragm ultrasound to predict weaning outcome: systematic review and meta-analysis. *Anaesthesiol Intensive Ther*, 2022, vol. 54, no. 2, pp. 164–174. DOI: 10.5114/ait.2022.117273.
33. 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, vol. 22, no. 1, pp. 109. DOI: 10.1186/s13054-018-2033-x.

34. Mercurio G., D'Arrigo S., Moroni R. et al. Diaphragm thickening fraction predicts noninvasive ventilation outcome: a preliminary physiological study // *Crit Care*. – 2021. – Vol. 25, № 1. – P. 219. DOI: 10.1186/s13054-021-03638-x.
35. Pirompanich P., Romsaiyut S. Use of diaphragm thickening fraction combined with rapid shallow breathing index for predicting success of weaning from mechanical ventilator in medical patients // *J Intensive Care*. – 2018. – Vol. 6. – P. 6. DOI: 10.1186/s40560-018-0277-9.
36. Poulard T., Bachasson D., Fossé Q. et al. Poor correlation between diaphragm thickening fraction and transdiaphragmatic pressure in mechanically ventilated patients and healthy subjects // *Anesthesiology*. – 2022. – Vol. 136, № 1. – P. 162–175. DOI: 10.1097/ALN.0000000000004042.
37. Samanta S., Singh R. K., Baronia A. K. et al. Diaphragm thickening fraction to predict weaning – a prospective exploratory study // *Journal of Intensive Care*. – 2017. – Vol. 5. – P. 62. DOI: 10.1186/s40560-017-0258-4.
38. Schepens T., Verbrugghe W., Dams K. et al. The course of diaphragm atrophy in ventilated patients assessed with ultrasound: a longitudinal cohort study // *Crit Care*. – 2015. – Vol. 19. – P. 422. DOI: 10.1186/s13054-015-1141-0.
39. Spiesshoefer J., Henke C., Herkenrath S. D. Noninvasive prediction of twitch transdiaphragmatic pressure: insights from spirometry, diaphragm ultrasound, and phrenic nerve stimulation studies // *Respiration*. – 2019. – Vol. 98, № 4. – P. 301–311. DOI: 10.1159/000501171.
40. 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. – Vol. 37, № 1. – P. 44–52. DOI: 10.1016/j.ultrasmedbio.2010.10.004.
41. Tuinman P. R., Jonkman A. H., Dres M. 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. – Vol. 46, № 4. – P. 594–605. DOI: 10.1007/s00134-019-05892-8.
42. Ueki J., De Bruin P. F., Pride N. B. In vivo assessment of diaphragm contraction by ultrasound in normal subjects // *Thorax*. – 1995. – Vol. 50, № 11. – P. 1157–1161. DOI: 10.1136/thx.50.11.1157.
43. Umbrello M., Formenti P., Longhi D. et al. Diaphragm ultrasound as indicator of respiratory effort in critically ill patients undergoing assisted mechanical ventilation: a pilot clinical study // *Crit Care*. – 2015. – Vol. 19, № 1. – P. 161. DOI: 10.1186/s13054-015-0894-9.
44. Van Doorn J. L. M., Wijntjes J., Saris C. G. J. et al. Association of diaphragm thickness and echogenicity with age, sex, and body mass index in healthy subjects // *Muscle Nerve*. – 2022. – Vol. 66, № 2. – P. 197–202. DOI: 10.1002/mus.27639.
45. Van Steveninck A. L., Imming L. M. Diaphragm dysfunction prior to intubation in a patient with Covid-19 pneumonia; assessment by point of care ultrasound and potential implications for patient monitoring // *Respir Med Case Rep*. – 2020. – Vol. 31. – P. 101284. DOI: 10.1016/j.rmcr.2020.101284.
46. Vetrugno L., Guadagnin G. M., Barbarioli F. et al. Ultrasound imaging for diaphragm dysfunction: a narrative literature review // *J Cardiothorac Vasc Anesth*. – 2019. – Vol. 33, № 9. – P. 2525–2536. DOI: 10.1053/j.jvca.2019.01.003.
47. Vetrugno L., Orso D., Corradi F. et al. Diaphragm ultrasound evaluation during weaning from mechanical ventilation in COVID-19 patients: a pragmatic, cross-section, multicenter study // *Respir Res*. – 2022. – Vol. 23, № 1. – P. 210. DOI: 10.1186/s12931-022-02138-y.
48. Vivier E., Mekontso Dessap A., Dimassi S. et al. Diaphragm ultrasonography to estimate the work of breathing during non-invasive ventilation // *Intensive Care Med*. – Vol. 38, № 5. – P. 796–803. DOI: 10.1007/s00134-012-2547-7.
49. Zambon M., Beccaria P., Matsuno J. et al. Mechanical ventilation and diaphragmatic atrophy in critically ill patients: an ultrasound study // *Crit Care Med*. – 2016. – Vol. 44, № 7. – P. 1347–1352. DOI: 10.1097/CCM.0000000000001657.
34. Mercurio G., D'Arrigo S., Moroni R. et al. Diaphragm thickening fraction predicts noninvasive ventilation outcome: a preliminary physiological study. *Crit Care*, 2021, vol. 25, no. 1, pp. 219. DOI: 10.1186/s13054-021-03638-x.
35. Pirompanich P., Romsaiyut S. Use of diaphragm thickening fraction combined with rapid shallow breathing index for predicting success of weaning from mechanical ventilator in medical patients. *J Intensive Care*, 2018, vol. 6, pp. 6. DOI: 10.1186/s40560-018-0277-9.
36. Poulard T., Bachasson D., Fossé Q. et al. Poor correlation between diaphragm thickening fraction and transdiaphragmatic pressure in mechanically ventilated patients and healthy subjects. *Anesthesiology*, 2022, vol. 136, no. 1, pp. 162–175. DOI: 10.1097/ALN.0000000000004042.
37. Samanta S., Singh R.K., Baronia A.K. et al. Diaphragm thickening fraction to predict weaning—a prospective exploratory study. *Journal of Intensive Care*, 2017, vol. 5, pp. 62. DOI: 10.1186/s40560-017-0258-4.
38. Schepens T., Verbrugghe W., Dams K. et al. The course of diaphragm atrophy in ventilated patients assessed with ultrasound: a longitudinal cohort study. *Crit Care*, 2015, vol. 19, pp. 422. DOI: 10.1186/s13054-015-1141-0.
39. Spiesshoefer J., Henke C., Herkenrath S.D. Noninvasive prediction of twitch transdiaphragmatic pressure: insights from spirometry, diaphragm ultrasound, and phrenic nerve stimulation studies. *Respiration*, 2019, vol. 98, no. 4, pp. 301–311. DOI: 10.1159/000501171.
40. 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, vol. 37, no. 1, pp. 44–52. DOI: 10.1016/j.ultrasmedbio.2010.10.004.
41. Tuinman P.R., Jonkman A.H., Dres M., 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, vol. 46, no. 4, pp. 594–605. DOI: 10.1007/s00134-019-05892-8.
42. Ueki J., De Bruin P.F., Pride N.B. In vivo assessment of diaphragm contraction by ultrasound in normal subjects. *Thorax*, 1995, vol. 50, no. 11, pp. 1157–1161. DOI: 10.1136/thx.50.11.1157.
43. Umbrello M., Formenti P., Longhi D. et al. Diaphragm ultrasound as indicator of respiratory effort in critically ill patients undergoing assisted mechanical ventilation: a pilot clinical study. *Crit Care*, 2015, vol. 19, no. 1, pp. 161. DOI: 10.1186/s13054-015-0894-9.
44. Van Doorn J.L.M., Wijntjes J., Saris C.G.J., et al. Association of diaphragm thickness and echogenicity with age, sex, and body mass index in healthy subjects. *Muscle Nerve*, 2022, vol. 66, no. 2, pp. 197–202. DOI: 10.1002/mus.27639.
45. Van Steveninck A.L., Imming L.M. Diaphragm dysfunction prior to intubation in a patient with Covid-19 pneumonia; assessment by point of care ultrasound and potential implications for patient monitoring. *Respir Med Case Rep*, 2020, vol. 31, pp. 101284. DOI: 10.1016/j.rmcr.2020.101284.
46. Vetrugno L., Guadagnin G.M., Barbarioli F. et al. Ultrasound imaging for diaphragm dysfunction: a narrative literature review. *J Cardiothorac Vasc Anesth*, 2019, vol. 33, no. 9, pp. 2525–2536. DOI: 10.1053/j.jvca.2019.01.003.
47. Vetrugno L., Orso D., Corradi F. et al. Diaphragm ultrasound evaluation during weaning from mechanical ventilation in COVID-19 patients: a pragmatic, cross-section, multicenter study. *Respir Res*, 2022, vol. 23, no. 1, pp. 210. DOI: 10.1186/s12931-022-02138-y.
48. Vivier E., Mekontso Dessap A., Dimassi S. et al. Diaphragm ultrasonography to estimate the work of breathing during non-invasive ventilation. *Intensive Care Med*, vol. 38, no. 5, pp. 796–803. DOI: 10.1007/s00134-012-2547-7.
49. Zambon M., Beccaria P., Matsuno J. et al. Mechanical ventilation and diaphragmatic atrophy in critically ill patients: an ultrasound study. *Crit Care Med*, 2016, vol. 44, no. 7, pp. 1347–1352. DOI: 10.1097/CCM.0000000000001657.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:

ГБУЗ «Научно-исследовательский институт скорой помощи им. Н. В. Склифосовского Департамента здравоохранения города Москвы»,
129090, Россия, Москва, пл. Сухаревская Б., д. 3.

Евграфов Павел Геннадьевич

младший научный сотрудник научного отделения лучевой диагностики.
E-mail: gembov@gmail.com, ORCID: 0000-0003-2713-3498,
SPIN: 7107-6326

INFORMATION ABOUT AUTHORS:

N. V. Sklifosovsky Research Institute for Emergency Medicine,
3, Sukharevskaya sq., Moscow, 129090, Russia.

Evgorov Pavel G.

Junior Research Fellow, Department of Diagnostic Radiology.
E-mail: gembov@gmail.com, ORCID: 0000-0003-2713-3498,
SPIN: 7107-6326

Хамидова Лайла Тимарбековна

д-р мед. наук, зав. научным отделением лучевой диагностики.

E-mail: layla72@mail.ru, ORCID: 0000-0002-9669-9164

Петриков Сергей Сергеевич

д-р мед. наук, профессор, член-корр. РАН, директор.

E-mail: Petrikovss@sklif.mos.ru,

ORCID: 0000-0003-3292-8789

Кулабухов Владимир Витальевич

канд. мед. наук, доцент, ведущий научный сотрудник, отделение неотложной хирургии, эндоскопии и интенсивной терапии.

E-mail: vkulabukhov@gmail.com,

ORCID: 0000-0003-1769-7038, SPIN: 8256-1630

Hamidova Layla T.

Dr. of Sci. (Med.), Head of the Department of Diagnostic Radiology, N. V. Sklifosovsky Research Institute for Emergency Medicine.

E-mail: layla72@mail.ru, ORCID: 0000-0002-9669-9164.

Petrikov Sergey S.

Dr. of Sci. (Med.), Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences.

E-mail: Petrikovss@sklif.mos.ru,

ORCID: 0000-0003-3292-8789

Kulabukhov Vladimir V.

Cand. of Sci. (Med.), Associate Professor, Leading Research Fellow, Department of Emergency Surgery, Endoscopy and Intensive Care.

E-mail: vkulabukhov@gmail.com,

ORCID: 0000-0003-1769-7038, SPIN: 8256-1630