

**Сонографические показатели  
диафрагмы и их корреляции  
со спирометрическими данными  
у здоровых лиц: проспективное  
клиническое исследование**

В.С. Шабаетв<sup>id</sup>, И.В. Оразмагомедова<sup>id</sup>, В.А. Мазурок<sup>id\*</sup>,  
А.В. Березина<sup>id</sup>, Л.Г. Васильева<sup>id</sup>, Д.А. Александрова<sup>id</sup>

ФГБУ «НМИЦ им. В.А. Алмазова», Санкт-Петербург, Россия

**Реферат**

**ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ:** Выявить корреляционные взаимосвязи сонографических показателей функционирования диафрагмы со спирометрическими данными у здоровых лиц. **МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ:** На базе ФГБУ «НМИЦ им. В.А. Алмазова» у 50 здоровых добровольцев (женщин — 30) оценили структурное (толщину) и функциональное (индекс утолщения и экскурсию) состояние диафрагмы с помощью ультразвукового исследования, а также спирометрические характеристики аппарата внешнего дыхания с помощью аппарата искусственной вентиляции легких. После чего провели статистическую обработку и корреляционный анализ. **РЕЗУЛЬТАТЫ:** Толщину диафрагмы (слева и справа) и ее экскурсию (справа) удалось оценить у всех испытуемых; экскурсию диафрагмы слева — только у 20% испытуемых. Спирометрию выполнили у всех испытуемых. Полученные данные согласуются с литературными. В частности, ультразвуковые и спирометрические показатели для здоровых лиц находились в рамках референтных значений. Сила инспираторных мышц также оказалась сопоставимой с литературными данными. Корреляционный анализ не выявил статистически значимых взаимосвязей между изученными ультразвуковыми и спирометрическими параметрами. Также не было выявлено взаимосвязи между возрастом и ультразвуковыми показателями диафрагмы. Найдены слабые статистически значимые связи между структурно-функциональным состоянием диафрагмы и антропометрическими характеристиками обследованных: массой тела и индексом массы тела. **ВЫВОДЫ:** Ультразвуковые показатели работы диафрагмы не коррелируют или плохо коррелируют со спирометрическими. У здоровых лиц нет оснований использовать ультразвуковое исследование

**Sonography indicators of diaphragm  
and their correlation with spirometry  
data in healthy individuals:  
a prospective study**

V.S. Shabaev<sup>id</sup>, I.V. Orazmagomedova<sup>id</sup>, V.A. Mazurok<sup>id\*</sup>,  
A.V. Berezina<sup>id</sup>, L.G. Vasilyeva<sup>id</sup>, D.A. Aleksandrova<sup>id</sup>

Almazov National Medical Research Centre, St. Petersburg, Russia

**Abstract**

**OBJECTIVE:** Revealing the correlation between sonography indicators of diaphragm performance and spirometry data of healthy persons. **MATERIALS AND METHODS:** The study was conducted at the Almazov National Medical Research Centre. The structural (thickness) and functional (thickening fraction and excursion of diaphragm) state of diaphragm of 50 healthy individuals (female — 30) was assessed with an ultrasound machine, and the spirometry characteristics of the external breathing apparatus were assessed with a ventilator. Afterwards the statistical and correlation analysis was conducted. **RESULTS:** It was possible to assess the thickness of diaphragm on both sides and the diaphragm excursion on the right in all subjects, the diaphragm excursion on the left — only in 20% of subjects. Spirometry has been performed in all subjects. The obtained data are consistent with the literature. In particular, sonography and spirometry indicators of the healthy individuals are within reference values. Inspiratory muscles strength has also proved to be consistent with the literature data. Correlation analysis has revealed no statistically significant relationship between the examined sonography and spirometry parameters. In addition, no relation between age and sonography indicators of diaphragm has been found. There are weak statistically significant relations revealed between the structural and functional state of diaphragm and such anthropometric characteristics of the subjects as body mass and body mass index. **CONCLUSIONS:** Sonography indicators of diaphragm performance do not correlate or correlate poorly with spirometry data. There is no reason to use sonography of diaphragm in healthy individuals since it does not practically provide any additional information about the state of external respiratory apparatus.

диафрагмы, так как оно практически не дает дополнительной информации о состоянии аппарата внешнего дыхания.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** ультразвуковое исследование, диафрагма, легкие, спирометрия, вентиляция легких

\* *Для корреспонденции:* Мазурок Вадим Альбертович — д-р мед. наук, профессор, заведующий клинической кафедрой анестезиологии-реаниматологии института медицинского образования ФГБУ «Национальный медицинский исследовательский центр им. В.А. Алмазова» Минздрава России, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: vmazurok@mail.ru

✉ *Для цитирования:* Шабает В.С., Мазурок В.А., Оразмагомедова И.В., Березина А.В., Васильева Л.Г., Александрова Д.А. Sonoграфические показатели диафрагмы и их корреляции со спирометрическими данными у здоровых лиц: клиническое исследование. Вестник интенсивной терапии им. А.И. Салтанова. 2023;2:91-101. <https://doi.org/10.21320/1818-474X-2023-2-91-101>

✉ *Поступила:* 03.09.2022

✉ *Принята к печати:* 28.02.2023

✉ *Дата онлайн-публикации:* 28.04.2023

**KEYWORDS:** sonography, diaphragm, lungs, spirometry, lung ventilation

\* *For correspondence:* Vadim A. Mazurok — M.D., Ph.D., professor and Chairman of Clinical Department of Anaesthesiology/Reanimatology Institute of Medical Education, Almazov National Medical Research Centre, St. Petersburg, Russia; e-mail: vmazurok@mail.ru

✉ *For citation:* Shabaev V.S., Orazmagomedova I.V., Mazurok V.A., Berezina A.V., Vasilyeva L.G., Aleksandrova D.A. Sonography indicators of diaphragm and their correlation with spirometry data in healthy individuals: clinical study. Annals of Critical Care. 2023;2:91-101. <https://doi.org/10.21320/1818-474X-2023-2-91-101>

✉ *Received:* 03.09.2022

✉ *Accepted:* 28.02.2023

✉ *Published online:* 28.04.2023

DOI: 10.21320/1818-474X-2023-2-91-101

## Введение

Внимание к работе диафрагмы остается на высоком уровне уже на протяжении многих лет [1–4]. Избыточная и недостаточная ее работа вносит существенный вклад в развитие/усугубление ряда патологических состояний и заболеваний бронхиальной астмы, хронической обструктивной болезни легких, сердечной недостаточности, пневмонии, сепсиса и патологических состояний в брюшной полости, приводящих к повышению внутрибрюшного давления [2, 5–7].

Из методов прикроватной оценки морфофункционального состояния диафрагмы привлекает ее ультразвуковое исследование (УЗИ) [2, 8], уже хорошо зарекомендовавшее себя в оценке легких [8], которое может оказаться полезным для диагностики и мониторинга в условиях отделения интенсивной терапии и реанимации [2, 10, 11], в частности, в контексте настройки параметров искусственной вентиляции легких (ИВЛ), отлучения от респираторной поддержки и т. п. Наряду с уже прочно вошедшей в практику легочно-протективной искусственной вентиляцией легких [12] идет поиск решений, направленных на защиту диафрагмы, — диафрагмощадящей вентиляции [13].

В связи с этим представляется актуальным и перспективным выявление взаимосвязей и поиск их зависимостей между спирометрическими и ультразвуковыми параметрами исходно на примере здоровых людей.

**Цель исследования** — выявление связи между sonoграфическими показателями функционирования диафрагмы и спирографическими данными у здоровых лиц в положении лежа.

## Материалы и методы

На базе ФГБУ «НМИЦ им. В.А. Алмазова» (Санкт-Петербург, Россия) проведено когортное исследование структурно-функционального состояния аппарата внешнего дыхания здоровых добровольцев в положении лежа на спине. Исследование соответствовало Хельсинской декларации 2000 г. и было одобрено локальным этическим комитетом (ЛЭК) (протокол заседания от 30.04.2022, председатель ЛЭК — Загородникова К.А.).

Наличие заболеваний, способных изменять в ту или иную сторону работу диафрагмы, являлось критерием невключения в исследование.

Возраст испытуемых составил от 22 до 30 лет, масса тела —  $67,9 \pm 14,5$  кг, рост —  $173,1 \pm 11,0$  см, индекс массы тела —  $22,4 \pm 3,3$  кг/м<sup>2</sup>.

Исследование соно- и спирометрических показателей функции внешнего дыхания выполнено в общей сложности у 50 добровольцев (женщин — 30).

Структурные и функциональные параметры диафрагмы — толщину, индекс утолщения, экскурсию, скоростные показатели во время спокойного и глубокого вдоха/выдоха — оценивали с помощью ультразвукового аппарата Philips CX50 (производство Philips Ultrasound, Inc, США).

Индекс утолщения (ИУ) диафрагмы при спокойном дыхании (СП) рассчитывали по формуле:

$$ИУ_{СП} = \frac{\text{Толщина диафрагмы в конце спокойного вдоха} - \text{Толщина диафрагмы в конце спокойного выдоха}}{\text{Толщина диафрагмы в конце спокойного вдоха}} \times 100.$$

Индекс утолщения диафрагмы при глубоком дыхании (ГЛ) рассчитывали по формуле:

$$ИУ_{ГЛ} = \frac{\text{Толщина диафрагмы в конце глубокого вдоха} - \text{Толщина диафрагмы в конце спокойного выдоха}}{\text{Толщина диафрагмы в конце глубокого вдоха}} \times 100.$$

Такого рода «оцифровка» функции диафрагмы в перспективе может оказать практическую помощь в решении вопроса как о необходимости начала респираторной поддержки, так и о возможности отлучения пациента от респиратора. Спирометрическую оценку осуществляли посредством параллельного измерения дыхательных объемов при спокойном и глубоком дыхании, времени вдоха и выдоха, также оценивали респираторный драйв и силу дыхательной мускулатуры путем измерения P 0.1 — снижение давления в дыхательных путях в первые 100 мс самостоятельной дыхательной попытки пациента при окклюзии дыхательного контура и Negative Inspiratory Force — максимальное усилие на вдохе — минимальное значение давления ниже уровня конечно-эспираторного давления в течение маневра «удержание вдоха».

Спирометрические измерения выполняли с помощью аппарата искусственной вентиляции легких «Беллавида 950е» (Россия, рег. №РЗН 2021/13644, дата гос. регистрации 31.03.2022) в режиме вентиляции с постоянным положительным давлением в связи с возможностью в этом режиме использовать аппарат только как спирометр при постоянном положительном давлении, равном 0 см вод. ст., без дополнительных влияний со стороны аппарата и с фракцией кислорода на вдохе, равной 21 %. Выбор респиратора обусловлен возможностью 1) измерения необходимых параметров с высокой дискретностью; 2) передачи на внешние носители цифровых данных, накопленных за период от 3 с до 1 года.

## Статистический анализ

Математический анализ собранных данных осуществляли с помощью программы STATISTICA-10 (StatSoft Inc, США) и внешнего пакета анализа для программы Microsoft Excel (Real Statistics Resource Pack), до-

полняющего стандартные возможности Excel. Характер распределения определяли с помощью критериев Колмогорова—Смирнова и Шапиро—Уилка. После оценки характера распределения вариант использовали предлагаемый программами критерий корреляции Спирмена с дальнейшей оценкой по шкале Чеддока: слабая — от 0,1 до 0,3; умеренная — от 0,3 до 0,5; заметная — от 0,5 до 0,7; высокая — от 0,7 до 0,9; весьма высокая (сильная) — от 0,9 до 1,0. В описательной части исследования результаты представляли в виде среднего и стандартного отклонения ( $M \pm SD$ ). Достоверность связей принимали при  $p \leq 0,05$ .

## Результаты исследования

Оценка репрезентативности исследования на этапе его планирования показала необходимость выборки не менее 100 испытуемых для достижения 80% мощности. После проведения пилотного исследования расчеты показали минимально необходимое количество испытуемых — 34 человека. В конечном итоге в исследование включили 50 человек, что обеспечивало мощность, равную 0,93.

Визуализация толщины диафрагмы с обеих сторон не вызывала затруднений, тогда как четкая визуализация ее экскурсии слева часто недоступна [8, 14, 15]. Из общего числа наблюдений (50) наилучшую визуализацию экскурсии диафрагмы слева мы получили только в 10 исследованиях (20%). Данные представлены в виде среднего (Ср), стандартного отклонения, минимального (Мин) и максимального (Макс) значений.

Результаты ультразвуковой диагностики диафрагмы представлены в табл. 1, 2.

Представленные в табл. 1, 2 результаты в целом согласуются с литературными данными [17–20].

Результаты изучения спирометрических показателей представлены в табл. 3.

Представленные в табл. 3 осредненные результаты спирометрической оценки функции аппарата внешнего дыхания также находились в допустимых для здоровых людей границах [21, 22].

Полученные спирометрические, ультразвуковые и антропометрические параметры проанализировали на предмет корреляционных взаимосвязей (табл. 4) и оценили возможность использования регрессионного анализа.

Согласно представленным в табл. 4 данным, между практически всеми ультразвуковыми и спирометрическими параметрами не было получено статистически значимых корреляционных взаимосвязей. Отмечалась только статистически значимая прямая слабая связь между глубоким вдохом и толщиной диафрагмы слева на высоте этого вдоха, а также отрицательная связь между глубоким вдохом и индексом утолщения диафрагмы слева.

**Таблица 1.** Ультразвуковые структурные и функциональные показатели экскурсии диафрагмы справа ( $n = 50$ , описательная статистика)

**Table 1.** Sonographic structural and functional indicators of the diaphragm excursion on the right ( $n = 50$ , descriptive statistics)

Показатель	Ср (Av) (M ± SD)	Мин	Макс	Данные литературы
Тсп-вд, мм	2,0 ± 0,4	1,1	3,1	2,1 ± 0,3 [16]
Тсп-выд, мм	1,5 ± 0,3	0,9	2,3	1,7 ± 0,2 [17] 1,6 ± 0,4 [18]
Тгл-вд, мм	4,5 ± 0,3	3,0	6,7	4,5 ± 0,9 [17]
Тгл-выд, мм	1,2 ± 0,3	0,6	1,7	1,6 ± 0,2 [17]
ИУсп-вд, %	29,0 ± 8,5	14,5	46,7	32 ± 15 [16]
ИУгл-вд, %	283,3 ± 81,1	161,5	483,3	—
Эсп-дых, см	1,8 ± 0,4	1,1	2,9	1,6 ± 0,3 [19]
ВРсокр, сп-дых, с	1,5 ± 0,4	0,5	2,8	1,27 ± 0,1 [20]
Скор. сокр, сп-дых, см/с	1,1 ± 0,3	0,6	1,9	1,12 ± 0,4 [20]
ВРрасслабления, сп-дых, с	1,5 ± 0,4	0,5	2,6	1,8 ± 0,3 [20]
Скор. расслабления, сп-дых, см/с	1,3 ± 0,5	0,6	3,3	1,05 ± 0,3 [20]
СрВРсокр : СрВРрасслабления, сп-дых	1:1 (1,5 ± 0,4 : 1,5 ± 0,4)	—	—	—
Эгл-дых, см	7,0 ± 1,5	5,1	11,9	6,9 ± 1,4 [20]
ВРсокр, гл-дых, с	2,6 ± 0,6	1,5	4,0	—
Скор. сокр, гл-дых, см/с	2,8 ± 0,9	1,5	5,4	—
ВРрасслабления, гл-дых, с	2,6 ± 0,9	1,1	6,1	1,5 ± 0,4 [20]
Скор. расслабления, гл-дых, см/с	2,6 ± 0,9	1,0	6,1	—
СрВРсокр : СрВРрасслабления, гл-дых	1 : 1 (2,6 : 2,6)	—	—	—
Вд — вдох; ВР — время; выд — выдох; гл — глубокий; дых — дыхание; ИУ — индекс утолщения; макс — максимум; мин — минимум; скор. — скорость; сокр — сокращения; сп — спокойный; ср — среднее; Т — толщина; Э — экскурсия.				
ВР — length; вд — inhalation; выд — exhalation; гл — deep; дых — breathing; ИУ — thickening fraction; макс — maximum; мин — minimum; скор — rate; сокр — contraction; сп — calm; ср — average; Т — thickness; Э — excursion.				

**Таблица 2.** Ультразвуковые структурные и функциональные показатели экскурсии диафрагмы слева ( $n = 10$ , описательная статистика)

**Table 2.** Sonographic structural and functional indicators of the diaphragm excursion on the left ( $n = 10$ , descriptive statistics)

Показатель	Ср (M ± SD)	Мин	Макс	Данные литературы
Тсп-вд, мм	1,8 ± 0,4	1,2	3,2	—
Тсп-выд, мм	1,4 ± 0,3	1,0	2,8	—
Тгл-вд, мм	3,9 ± 0,3	2,1	6,2	—
Тгл-выд, мм	1,1 ± 0,3	0,7	1,8	—
ИУсп-вд, %	26,2 ± 8,9	15,3	45,8	30 ± 14 [16]

Показатель	Ср (M ± SD)	Мин	Макс	Данные литературы
ИУгл-вд, %	259,2 ± 98,9	111,8	529,2	—
Эсп-дых, см	1,4 ± 0,3	1,0	1,9	1,6 ± 0,3 [19]
ВРсокр, сп-дых, с	1,5 ± 0,4	0,9	2,1	—
Скор. сокр, сп-дых, см/с	1,4 ± 0,5	0,9	2,2	—
ВРрасслабления, сп-дых, с	1,3 ± 0,5	0,8	2,0	1,8 ± 0,3 [20]
Скор. расслабления, сп-дых, см/с	1,5 ± 0,5	0,9	2,3	—
СрВРсокр : СрВРрасслабления, сп-дых	1,1:1,0 (1,5:1,3)	—	—	—
Эгл-дых, см	6,3 ± 0,9	5,1	7,9	6,9 ± 1,4 [20]
ВРсокр, гл-дых, с	2,9 ± 1,3	1,5	6,0	—
Скор. сокр, гл-дых, см/с	2,6 ± 0,7	1,5	3,8	—
ВРрасслабления, гл-дых, с	2,6 ± 0,9	1,6	4,5	1,5 ± 0,4 [20]
Скор. расслабления, гл-дых, см/с	2,6 ± 0,7	1,4	3,5	—
СрВРсокр : СрВРрасслабления, гл-дых	1,1 : 1,0 (2,9 : 2,6)	—	—	—
Вд — вдох; ВР — время; выд — выдох; гл — глубокий; дых — дыхание; ИУ — индекс утолщения; макс — максимум; мин — минимум; скор. — скорость; сокр — сокращения; сп — спокойный; ср — среднее; Т — толщина; Э — экскурсия.				
Вд — inhalation; ВР — length; выд — exhalation; гл — deep; дых — breathing; ИУ — thickening fraction; макс — maximum; мин — minimum; скор. — rate; сокр — contraction; сп — calm; ср — average; Т — thickness; Э — excursion.				

**Таблица 3. Спирометрические показатели функции аппарата внешнего дыхания в режиме CPAP (n = 50)**
**Table 3. Spirometry functioning indicators of the external breathing apparatus in the CPAP mode (n = 50)**

Показатель	Ср (M ± SD)	Мин	Макс	Данные литературы
ДО сп-дых, мл	572 ± 118	385	780	300–900 [21, 22]
Врвд сп-дых, с	1,5 ± 0,1	1,0	1,7	1,0–2,0 [23]
Врвыд сп-дых, с	3,0 ± 0,9	1,0	5,3	—
Врвд : Врвыд (сп-дых)	1:2 (1,5 ± 0,1; 3,0 ± 0,9)	—	—	1:2 [23, 24]
ДО гл-дых, мл	3829 ± 526	3100	5600	3500–5000 [21, 22]
Врвд гл-дых, с	1,6 ± 0,5	0,3	3,7	—
Врвыд гл-дых, с	4,0 ± 1,8	1,5	8,0	—
Врвд : Врвыд, гл-дых	1:2,5 (1,6:4,0)	—	—	—
Р 0.1, см вод. ст.	-2,6 ± 0,7	-1,1	-4,0	-2 ... -4 [23, 25]
NIF, см вод. ст.	-53,23 ± 3,4	-48,1	-60,0	Для НИВЛ не определена, вариабельна в исследованиях [26]
Вд — вдох; ВР — время; выд — выдох; гл — глубокий; ДО — дыхательный объем; дых — дыхание; макс — максимум; мин — минимум; сп — спокойный; ср — среднее.				
Вд — inhalation; ВР — length; выд — exhalation; гл — deep; ДО — tidal volume; дых — breathing; макс — maximum; мин — minimum; сп — calm; ср — average.				

**Таблица 4.** Результаты корреляционного анализа спирометрических и ультразвуковых параметров (для правой стороны  $n = 50$ , для левой  $n = 10$ )

**Table 4.** Results of the correlation analysis of the spirometry and sonography parameters (on the right  $n = 50$ , on the left  $n = 10$ )

Сравниваемые показатели	Индекс корреляционного анализа Спирмена ( $r_s$ )	Уровень значимости ( $p$ )
<b>Спокойные вдох и выдох</b>		
ДО и Т справа (Сп-Вд)	-0,06	0,64
ДО и Т справа (Сп-выд)	0,014	0,91
ДО и Т слева (Сп-Вд)	0,15	0,26
ДО и Т слева (Сп-выд)	0,17	0,21
ДО и ИУ справа (Сп-вд)вд	-0,17	0,22
ДО и ИУ слева (Сп-вд)вд	0,06	0,66
<b>Спокойное дыхание</b>		
ДО и Э справа (Сп-дых)	-0,01	0,92
ДО и Вр.сокр справа (Сп-дых)	0,17	0,22
ДО и Скор. Сокр. справа (Сп-дых)	0,13	0,34
ДО и Вр. расслабления справа (Сп-дых)	-0,02	0,8
ДО и Скор. расслабления справа (Сп-дых)	0,14	0,3
ДО и Э слева (Сп-дых)	0,6	0,06
ДО и Вр. Сокр. слева (Сп-дых)	0,14	0,69
ДО и Скор. Сокр. слева (Сп-дых)	0,08	0,81
ДО и Вр. расслабления слева (Сп-дых)	0,32	0,35
ДО и Скор. расслабления слева (Сп-дых)	0,16	0,64
Вр. Вд. и Вр. Сокр. справа (Сп-дых)	0,15	0,29
Вр. Вд. и Вр. Сокр. слева (Сп-дых)	0,43	0,21
Вр. Выд. и Вр. расслабления справа (Сп-дых)	0,07	0,58
Вр. Выд. и Вр. расслабления слева (Сп-дых)	-0,14	0,68
<b>Максимально глубокий вдох</b>		
ДОгл и Т справа (Гл-вд)	-0,02	0,87
ДОгл и Т справа (Гл-выд)	0,02	0,85
ДОгл и Т слева (Гл-вд)	0,01	0,91
ДОгл и Т слева (Гл-выд)	0,3	0,03*
ДОгл и ИУ справа (Гл-вд)	-0,03	0,82
ДОгл и ИУ слева (Гл-вд)	-0,3	0,03*
<b>Глубокое дыхание</b>		
ДОгл и Э справа (Гл-дых)	-0,03	0,83
ДОго и Вр. Сокр. справа (Гл-дых)	-0,25	0,07

Сравниваемые показатели	Индекс корреляционного анализа Спирмена ( $r_s$ )	Уровень значимости ( $p$ )
ДОгл и Скор. Сокр. справа (Гл-дых)	0,08	0,54
ДОгл и Вр. расслабления справа (Гл-дых)	-0,13	0,34
ДОгл и Скор. расслабления справа (Гл-дых)	0,04	0,74
ДОгл и Э слева (Гл-дых)	0,49	0,14
ДОгл и Вр. Сокр. слева (Гл-дых)	0,24	0,49
ДОгл и Скор. Сокр. слева (Гл-дых)	0,14	0,68
ДОгл и Вр. расслабления слева (Гл-дых)	0,46	0,17
ДОгл и Скор. расслабления слева (Гл-дых)	0,21	0,54
* Показатели, корреляция которых достигала статистической значимости ( $p < 0,05$ ).		
Вд — вдох; ВР — время; Выд — выдох; Гл — глубокий; ДО — дыхательный объем; Дых — дыхание; ИУ — индекс утолщения; Скор — скорость; Сокр — сокращения; Сп — спокойный; Т — толщина; Э — экскурсия.		
Вд — inhalation; ВР — length; Выд — exhalation; Гл — deep; ДО — tidal volume; Дых — breathing; ИУ — thickening fraction; Скор — rate; Сокр — contraction; Сп — calm; Т — thickness; Э — excursion.		

Между полом и ультразвуковыми показателями работы диафрагмы статистически значимая корреляционная взаимосвязь выявилась при оценке следующих пар: пол и толщина диафрагмы справа в конце максимально глубокого вдоха и выдоха ( $r_s = 0,33$ ,  $p = 0,01$  и  $r_s = 0,39$ ,  $p = 0,008$  соответственно); пол и толщина диафрагмы слева в конце спокойного вдоха и выдоха ( $r_s = 0,39$ ,  $p = 0,005$  и  $r_s = 0,31$ ,  $p = 0,02$  соответственно); пол и толщина диафрагмы слева в конце максимально глубокого выдоха ( $r_s = 0,36$ ,  $p = 0,01$ ); пол и время сокращения диафрагмы справа во время спокойного дыхания ( $r_s = 0,31$ ,  $p = 0,02$ ); пол и максимальная амплитуда движения диафрагмы справа при глубоком дыхании ( $r_s = 0,28$ ,  $p = 0,04$ ); пол и максимальная амплитуда движения диафрагмы слева при спокойном дыхании ( $r_s = 0,7$ ,  $p = 0,02$ ); пол и индекс утолщения для левой гемисферы при спокойном дыхании ( $r_s = 0,29$ ,  $p = 0,03$ ).

Взаимосвязи между возрастом и ультразвуковыми показателями диафрагмы не выявлено ни по одной из исследуемых характеристик.

Среди антропометрических показателей статистически значимую связь наблюдали между массой тела и следующими параметрами: толщиной диафрагмы справа в конце спокойного и максимального вдоха ( $r_s = 0,28$ ,  $p = 0,04$ ); толщиной диафрагмы справа в конце максимального выдоха ( $r_s = 0,36$ ,  $p = 0,01$ ); временем расслабления правой гемисферы диафрагмы во время глубокого дыхания ( $r_s = -0,29$ ,  $p = 0,03$ ); скоростью расслабления правой гемисферы диафрагмы во время глубокого дыхания ( $r_s = 0,28$ ,  $p = 0,04$ ); временем сокращения диафрагмы слева при глубоком дыхании ( $r_s = 0,66$ ,  $p = 0,03$ ).

Анализ на наличие взаимосвязи между индексом массы тела выявил статистически значимые связи со следующими показателями: толщиной правой геми-

сферы диафрагмы на высоте спокойного вдоха и в конце спокойного выдоха ( $r_s = 0,31$ ,  $p = 0,02$  и  $r_s = 0,28$ ,  $p = 0,04$  соответственно); скоростью расслабления правой гемисферы диафрагмы во время спокойного дыхания ( $r_s = 0,32$ ,  $p = 0,02$ ); временем расслабления правой гемисферы диафрагмы во время глубокого дыхания ( $r_s = -0,43$ ,  $p = 0,001$ ); скоростью расслабления правой гемисферы диафрагмы во время глубокого дыхания ( $r_s = 0,39$ ,  $p = 0,004$ ); временем сокращения левой гемисферы диафрагмы во время глубокого дыхания ( $r_s = 0,67$ ,  $p = 0,03$ ).

В связи с тем, что не было выявлено статистически значимых корреляционных взаимоотношений между большинством сравниваемых параметров, регрессионный анализ не проводили.

## Обсуждение

Достаточно неожиданным оказалось отсутствие статистически значимых взаимосвязей между дыхательными объемами и ультразвуковыми показателями диафрагмы, тогда как по другим показателям корреляционная связь была весьма вариабельной и практически нигде не достигала высокой взаимосвязи. Не находили сильной корреляционной зависимости между работой диафрагмы и спирометрическими показателями и другие исследователи, а там, где на наличие такой связи указывали, ее сила достигала лишь слабого или среднего, а не высокого, как можно было бы предполагать, уровня [8, 17, 27].

По результатам нашего исследования не выявлено взаимосвязи между возрастом и ультразвуковыми показателями работы диафрагмы. Наибольшее количество

статистически значимых, но также невысоких уровней корреляционных связей с ультразвуковыми параметрами диафрагмы имели масса тела и пол испытуемых, что также согласуется с исследованиями других авторов [2, 18]. Некоторые авторы указывают, что, возможно, не столько масса тела может влиять на параметры работы диафрагмы, сколько собственно мышечная масса. Толщина диафрагмы может быть больше у тренированных, особенно если тренированность связана с необходимостью развития дыхательной мускулатуры [28]. Этим, вероятно, объясняется большее влияние мышечной массы у мужчин на ультразвуковые показатели диафрагмы [29]. Аналогичные «шумы», вероятно, могут отмечаться и у женщин: например, если женщина занимается спортом и имеет более выраженную мышечную массу.

Результаты выполненного исследования привлекают внимание к нескольким моментам. Во-первых, к противоречивости, статистически незначимым взаимосвязям, а при их наличии — к невысокому уровню корреляций между ультразвуковыми параметрами функционирования диафрагмы (временными показателями ее сокращения/расслабления и дыхательным циклом) и в первую очередь функциональными объемами легких. По-видимому, это обусловлено тем, что не следует отождествлять сокращение диафрагмы с количеством поступающего в легкие воздуха. Эти процессы скорее должны рассматриваться как последовательные: сокращение диафрагмы начинается раньше, чем поступает воздух в легкие, и между ними есть период создания отрицательного давления в плевральной полости. Точно так же дело обстоит с расслаблением диафрагмы и последующим выдохом воздуха из легких.

Именно такими соображениями можно объяснить факт «несоответствия» между спирометрическим и ультразвуковым отношением времени вдоха и выхода. Как при спокойном, так и глубоком дыхании спирометрическое отношение составило примерно 1 : 2, что согласуется с литературными данными [10, 23], тогда как сонографическое отношение оказалось ближе к 1 : 1. Таким образом, с помощью спирометра мы констатируем время, необходимое для заполнения воздухом легких, — время вдоха, но не время сокращения диафрагмы. Соответственно, с помощью ультразвукового исследования и спирометрии мы наблюдаем за разными процессами в разное время. Более детализированное физиологическое исследование могло бы показать, на каком этапе от начала сокращения диафрагмы начинает поступать воздух в легкие.

Не менее значимым, на наш взгляд, фактом является отсутствие интуитивно ожидаемой максимальной корреляционной связи между дыхательными объемами и экскурсией диафрагмы. Не обнаружив такой

связи, мы, как и другие авторы [17], пришли к выводу, что причиной тому может быть, во-первых, работа вспомогательной мускулатуры, во-вторых, разные типы дыхания (брюшной или грудной) и некие иные факторы, например, несоответствие дыхательного объема изменению диафрагмы может объясняться ее специфической геометрией и креплением в определенной точке, затрудняющей ультразвуковое исследование [28, 30].

Анализ литературных данных также выявил различные и даже противоположные результаты: от наличия хорошей положительной корреляционной связи с дыхательными объемами [18] до отсутствия таковой [17]. Также отличаются и половые различия ультразвуковых характеристик диафрагмальной функции: одни авторы указывают на значимую корреляционную взаимосвязь пола и ультразвуковых параметров диафрагмы [6, 14, 16, 18], другие полагают, что корреляционная связь зависит скорее от иных параметров [28], и не находят [27] разницы ультразвуковых показателей диафрагмы между женщинами и мужчинами. Неоднозначные корреляции обнаруживаются и между толщиной диафрагмы и максимальным давлением вдоха [31], функциональной остаточной емкостью [17] и общей емкостью легких.

Разноречивость представленных в литературе результатов ультразвукового исследования диафрагмы у здоровых объясняется и оператор-зависимостью метода [2, 8, 17], несмотря на хорошую воспроизводимость его результатов [20], влиянием антропометрических характеристик испытуемых и методологическими аспектами выполненных исследований: положением тела исследуемых и постановкой датчика, размерами и неоднородностью групп и т. д. [18, 27, 28].

В исследованиях на пациентах с разной патологией, например, таких как хроническая обструктивная болезнь легких, бронхиальная астма, выявляется корреляционная связь однонаправленного снижения функции внешнего дыхания, как при спокойном, так и при глубоком дыхании, с ультразвуковыми параметрами диафрагмы — т. е. однонаправленное снижение дыхательных объемов и экскурсии диафрагмы [2, 27, 32], в том числе и при одностороннем диафрагмальном поражении [32, 34, 35].

Анализируя представленные выше разночтения, как собственные, так и почерпнутые из литературных источников, можно предположить наличие еще одного причинного фактора, связанного с тем, что диафрагма — не линейная мышечная структура, а представляет собой куполообразный мышечно-фиброзный орган. То есть исследователи, изучая только мышечную часть толщины диафрагмы в разные моменты дыхательного цикла, не учитывают ее анатомическую неоднородность, что может объяснять низкие корреляционные связи между сокращением мышечной части диафрагмы и количеством поступающего в легкие воздуха.



Сокращаясь, мышечная часть диафрагмы сдвигает фиброзную часть, генерируя необходимое разрежение в плевральной полости, что объясняет сохранность функции внешнего дыхания при одностороннем поражении диафрагмы и фактическую оценку принятых параметров в каждом исследовании — толщину и экскурсию.

Подводя итог вышесказанному, невысокая корреляционная связь между изученными показателями не позволяет говорить о том, что ультразвуковое исследование диафрагмы может быть использовано в качестве единственного инструмента оценки состояния аппарата внешнего дыхания. Скорее такая комплексная оценка требует применения обоих методов, особенно учитывая то, что диафрагма не только не единственная мышца, обеспечивающая внешнее дыхание, но еще и функционирующая по-разному, в зависимости, например, от типа дыхания и ее конфигурации [30].

Ультразвуковое исследование диафрагмы все же можно с успехом применять в клинической практике для оценки ее функции в динамике по мере течения болезни и сопутствующих спирометрических изменений [32, 32], что особенно актуально — в случае, например, ее одностороннего поражения [2, 32].

Такие ультразвуковые показатели, как время и скорость сокращения/расслабления диафрагмы, могут стать важными диагностическими, прогностическими и мониторируемыми показателями и для пациентов отделения реанимации и интенсивной терапии, например, в контексте своевременного начала респираторной поддержки и выбора ее параметров с акцентом на оптимальном соотношении работы и разгрузки диафрагмы. Подобные умозаключения [28, 37] основаны на известных преимуществах сонографического исследования: экономичность и доступность у постели больного, неинвазивность и простота использования, возможность оценки вклада дисфункции диафрагмы в развитие дыхательной недостаточности и прогнозирования отлучения от ИВЛ. Многие из вышеизложенного, однако, требует дальнейших исследований.

## Заключение

На основании выполненного исследования можно сформулировать следующие выводы.

### ORCID авторов:

Шаббаев В.С. — 0000-0002-5336-003X

Оразмагомедова И.В. — 0000-0001-9629-4450

Мазурок В.А. — 0000-0003-3917-0771

1. Ультразвуковые структурно-функциональные показатели работы диафрагмы не коррелируют или плохо коррелируют со спирометрическими, т. е. дыхательными, объемами.
2. У здоровых лиц нет оснований использовать ультразвуковое исследование диафрагмы, так как оно практически не дает дополнительной информации о состоянии аппарата внешнего дыхания.
3. Разночтения между сонографическими показателями функции диафрагмы и спирометрическими данными обусловлены многочисленными причинами, в том числе методологическими особенностями выполненных исследований, а также, по-видимому, неизвестным вкладом работы дополнительной дыхательной мускулатуры и типом дыхания.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Disclosure.** The authors declare that they have no competing interests.

**Вклад авторов.** Все авторы в равной степени участвовали в разработке концепции статьи, получении и анализе фактических данных, написании и редактировании текста статьи, проверке и утверждении текста статьи.

**Author contribution.** All authors according to the ICMJE criteria participated in the development of the concept of the article, obtaining and analyzing factual data, writing and editing the text of the article, checking and approving the text of the article.

**Этическое утверждение.** Проведение исследования было одобрено локальным этическим комитетом ФГБУ «НМИЦ им. В.А. Алмазова», протокол от 30.04.2022.

**Ethics approval.** This study was approved by the local Ethical Committee of Almazov National Medical Research Centre (reference number: 30.04.2022).

**Декларация о наличии данных.** Данные, подтверждающие выводы этого исследования, находятся в открытом доступе в репозитории Mendeley Data, по адресу: DOI: 10.17632/d3b67fpzbb.1

**Data Availability Statement.** The data that support the findings of this study are openly available in repository Mendeley Data at DOI: 10.17632/d3b67fpzbb.1

Березина А.В. — 0000-0002-5770-3845

Васильева Л.Г. — 0000-0001-9611-9222

Александрова Д.А. — 0000-0002-0734-7344

Литература/References

- [1] *Меньшикова И.Г., Перлей В.Е., Скляр И.В. и др.* Взаимосвязь показателей функционального состояния диафрагмы и легочной гемодинамики у больных хронической обструктивной болезнью легких. Бюллетень физиологии и патологии дыхания. 2018; 67: 25–30. DOI: 10.12737/article\_5a9f25cfacfd68.86589251 [Men'shikova I.G., Perley V.E., Sklyar I.V., et al. Interrelation of indicators of the functional state of the diaphragm and pulmonary hemodynamics in patients with chronic obstructive pulmonary disease. Bulletin physiology and pathology of respiration. 2018; 67: 25–30. DOI: 10.12737/article\_5a9f25cfacfd68.86589251 (In Russ)]
- [2] *Неклюдова Г.В., Авдеев С.Н.* Возможности ультразвукового исследования диафрагмы. Терапевтический архив. 2019; 91(3): 86–92. DOI: 10.26442/00403660.2019.03.000129 [Nekludova G.V., Avdeev S.N. Possibilities of ultrasound research of the diaphragm. Therapeutic Archive. 2019; 91(3): 86–92. DOI: 10.26442/00403660.2019.03.000129 (In Russ)]
- [3] *Boon A.J., Harper C.J., Ghahfarokhi L.S., et al.* Two-dimensional ultrasound imaging of the diaphragm: quantitative values in normal subjects. Muscle Nerve. 2013; 47(6): 884–9. DOI: 10.1002/mus.23702
- [4] *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; 44(4): 786–93. DOI: 10.1016/j.ultrasmedbio.2017.11.020
- [5] *Qaiser M., Khan N., Jain A.* Ultrasonographic Assessment of Diaphragmatic Excursion and its Correlation with Spirometry in Chronic Obstructive Pulmonary Disease Patients. International journal of applied & basic medical research. 2020; 10(4): 256–9. DOI: 10.4103/ijabmr.IJABMR\_192\_20
- [6] *Mead J., Loring S.H.* Analysis of volume displacement and length changes of the diaphragm during breathing. J Appl Physiol. 1982; 53: 750–5. DOI: 10.1152/jappl.1982.53.3.750
- [7] *Laghi F., Tobin M.J.* Disorders of the respiratory muscles. Am J Respir Crit Care Med. 2003; 168: 10–48. DOI: 10.1164/rccm.2206020
- [8] *Santana P.V., Cardenas L.Z., Pereira de Albuquerque A.L., et al.* Diaphragmatic ultrasound: a review of its methodological aspects and clinical uses. J Bras Pneumol. 2020; 46(6): e20200064. DOI: 10.36416/1806-3756/e20200064
- [9] *Лакхин Р.Е., Жирнова Е.А., Щеголев А.В. и др.* Ультразвуковой индекс поражения легких как предиктор исходов лечения: когортное исследование 388 пациентов с коронавирусной инфекцией. Вестник интенсивной терапии им. А.И. Салтанова. 2022; 3: 45–56. DOI: 10.21320/1818-474X-2022-3-45-56 [Lakhin R.E., Zhirnova E.A., Shchegolev A.V., et al. Ultrasound-guided lung lesion index as a predictor of treatment outcomes: cohort study of 388 patients with coronavirus infection. Annals of Critical Care. 2022; 3: 45–56. DOI: 10.21320/1818-474X-2022-3-45-56 (In Russ)]
- [10] *Сатишур О.Е.* Механическая вентиляция легких. 2017. [Satisnur O.E. Mekhanicheskaya ventilyatsiya legkikh. 2017. (In Russ)]
- [11] *Vivier E., Mekontso D.A., Dimassi S., et al.* Diaphragm ultrasonography to estimate the work of breathing during non-invasive ventilation. Intensive care medicine. 2012; 38(5): 796–803. DOI: 10.1007/s00134-012-2547-7
- [12] *Трембач Н.В., Заболотских И.Б., Стаканов А.В. и др.* Протективная вентиляция легких в абдоминальной хирургии. Анестезиология и реаниматология. 2018; 3: 2532. DOI: 10.17116/anaesthesiology201803125 [Trembach N.V., Zabolotskikh I.B., Stakanov A.V., et al. Protective ventilation in abdominal surgery. Russian Journal of Anaesthesiology and Reanimatology. 2018; 3: 2532. DOI: 10.17116/anaesthesiology201803125 (In Russ)]
- [13] *Schepens T., Dres M., Heunks L., et al.* Diaphragm-protective mechanical ventilation. Current Opinion in Critical Care. 2019; 25(1): 77–85. DOI: 10.1097/MCC.0000000000000578
- [14] *Boussuges A., Finance J., Chaumet G., et al.* Diaphragmatic motion recorded by M-mode ultrasonography: limits of normality. ERJ Open Research. 2021; 7(1): 00714–2020. DOI: 10.1183/23120541.00714-2020
- [15] *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 medicine. 2020; 46(4): 594–605. DOI: 10.1007/s00134-019-05892-8
- [16] *Boussuges A., Rives S., Finance J., et al.* Ultrasound Assessment of Diaphragm Thickness and Thickening: Reference Values and Limits of Normality When in a Seated Position. Frontiers in Medicine. 2021; 8: 742703. DOI: 10.3389/fmed.2021.742703
- [17] *Ueki J., De Bruin P.F., Pride N.B.* In vivo assessment of diaphragm contraction by ultrasound in normal subjects. Thorax. 1995; 50(11): 1157–61. DOI: 10.1136/thx.50.11.1157
- [18] *Carrillo-Esper R., Pérez-Calatayud Á.A., Arch-Tirado E., et al.* Standardization of Sonographic Diaphragm Thickness Evaluations in Healthy Volunteers. Respir Care. 2016; 61(7): 920–4. DOI: 10.4187/respcare.03999
- [19] *Boussuges A., Gole Y., Blanc P.* Diaphragmatic motion studied by m-mode ultrasonography: methods, reproducibility, and normal values. Chest. 2009; 135(2): 391–400. DOI: 10.1378/chest.08-1541
- [20] *Testa A., Soldati G., Giannuzzi R., et al.* Ultrasound M-mode assessment of diaphragmatic kinetics by anterior transverse scanning in healthy subjects. Ultrasound Med Biol. 2011; 37(1): 44–52. DOI: 10.1016/j.ultrasmedbio.2010.10.004
- [21] *Чучалин А.Г.* Респираторная медицина. 2017. [Chuchalin A.G. Respiratornaya meditsina. 2017. (In Russ)]
- [22] *Зарифьян А.Г., Наумова Т.Н., Нартаева А.К., Кононец И.Е.* Физиология дыхания: учебное пособие. Бишкек: Изд-во КРСУ, 2013. [Zarif'yan A.G., Naumova T.N., Nartaeva A.K., Kononets I.E. Fiziologiya dykhaniya: uchebnoe posobie. Bishkek: KRSU, 2013. (In Russ)]
- [23] *Шурыгин И.А.* Искусственная вентиляция легких как медицинская технология. М.: Бином, 2020. [Shurygin I.A. Iskusstvennaya ventilyatsiya legkikh kak meditsinskaya tekhnologiya. Moscow: Binom, 2020. (In Russ)]
- [24] *Чурсин В.В.* Искусственная вентиляция легких: Учебно-методическое пособие. Алматы, 2008. [Chursin V.V. Iskusstvennaya ventilyatsiya legkikh: Uchebno-metodicheskoe posobie. Almaty, 2008. (In Russ)]

- [25] *Montgomery A.B., Holle R.H., Neagley S.R., et al.* Prediction of successful ventilator weaning using airway occlusion pressure and hypercapnic challenge. *Chest*. 1987; 91: 496–9.
- [26] *Sclausser P.I.M., Franco P.V., Fregonezi G.A., et al.* Reference values for maximal inspiratory pressure: a systematic review. *Can Respir J*. 2014; 21(1): 43–50. DOI: 10.1155/2014/982374
- [27] *Carrie C., Bonnarde E., Vally R., et al.* Impairment due to Neuromuscular Disease and its Correlation with Diaphragmatic Ultrasound: A Preliminary Study. *Ultrasound in medicine & biology*. 2016; 42(1): 143–9. DOI: 10.1016/j.ultrasmedbio.2015.09.020
- [28] *Brown P.I., Venables H.K., Liu H., et al.* Ventilatory muscle strength, diaphragm thickness and pulmonary function in world-class powerlifters. *Eur J Appl Physiol*. 2013; 113(11): 2849–55. DOI: 10.1007/s00421-013-2726-4
- [29] *Harris R.S., Giovannetti M., Kim B.K.* Normal ventilatory movement of the right hemidiaphragm studied by ultrasonography and pneumotachography. *Radiology*. 1983; 146(1): 141–4. DOI: 10.1148/radiology.146.1.6849035
- [30] *Wait J.L., Johnson R.L.* Patterns of shortening and thickening of the human diaphragm. *J Appl Physiol*. 1997; 83(4): 1123–32. DOI: 10.1152/jappl.1997.83.4.1123
- [31] *McCool F.D., Conomos P., Benditt J.O., et al.* Maximal inspiratory pressures and dimensions of the diaphragm. *Am J Respir Crit Care Med*. 1997; 155: 1329–34.
- [32] *Santana P.V., Prina E., Albuquerque A.L.P., et al.* Identifying decreased diaphragmatic mobility and diaphragm thickening in interstitial lung disease: the utility of ultrasound imaging. *J Bras Pneumol*. 2016; 42(2): 88–94. DOI: 10.1590/S1806-37562015000000266
- [33] *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; 192(9): 1080–8. DOI: 10.1164/rccm.201503-0620OC
- [34] *Gottesman E., McCool F.D.* Ultrasound evaluation of the paralyzed diaphragm. *American journal of respiratory and critical care medicine*. 1997; 155(5): 1570–4. DOI: 10.1164/ajrccm.155.5.9154859
- [35] *Lloyd T., Tang Y.M., Benson M.D., King S.* Diaphragmatic paralysis: the use of M mode ultrasound for diagnosis in adults. *Spinal cord*. 2006; 44(8): 505–8. DOI: 10.1038/sj.sc.3101889
- [36] *Ben-Dov I.* Diaphragmatic Paralysis — Symptoms, Evaluation, Therapy and Outcome. In: Molloy E., editor. *Congenital Diaphragmatic Hernia — Prenatal to Childhood Management and Outcomes* [Internet]. London: IntechOpen; 2012 [cited 2022 Nov 05]. Available from: <https://www.intechopen.com/chapters/37827> DOI: 10.5772/33997
- [37] *DiNino E., Gartman E.J., Sethi J.M., et al.* Diaphragm ultrasound as a predictor of successful extubation from mechanical ventilation. *Thorax*. 2014; 69(5): 423–7. DOI: 10.1136/thoraxjnl-2013-204111