

УДК 615.828+615.816:616.26
<https://doi.org/10.32885/2220-0975-2025-1-125-140>

© К. М. Толмачев, Ю. П. Потехина, 2025

Функции диафрагмы и их нарушение при искусственной вентиляции легких (обзор литературы)

К. М. Толмачев¹, Ю. П. Потехина^{2,3,*}

¹ Городская клиническая больница им. С. С. Юдина
115446, Москва, Коломенский проезд, д. 4

² Институт остеопатии
191024, Санкт-Петербург, ул. Дегтярная, д. 1, лит. А

³ Приволжский исследовательский медицинский университет
603005, Нижний Новгород, пл. Минина и Пожарского, д. 10/1



Целью данного обзора была систематизация функций диафрагмы и их нарушений, возникающих при искусственной вентиляции легких (ИВЛ), а также оценка возможностей их остеопатической коррекции. Диафрагма является не только главной дыхательной мышцей, но и принимает участие в функционировании сердечно-сосудистой, пищеварительной и других систем организма, включая центральную нервную систему. Следовательно, дисфункции диафрагмы негативно отражаются на состоянии всего организма. Они могут формироваться по разным причинам, в том числе у пациентов, длительно находящихся на ИВЛ. Инструментальная диагностика дисфункций диафрагмы не разработана, но врачи-osteопаты владеют техниками их диагностики и коррекции. Найдено относительно небольшое количество публикаций, доказывающих положительное влияние остеопатической коррекции на функцию внешнего дыхания. Остеопатическое воздействие на диафрагму имеет потенциальную пользу для сокращения времени пребывания пациентов на ИВЛ и их реабилитации после. В доступной литературе таких исследований не найдено, однако они имеют высокую актуальность и могут открыть новые перспективы для применения остеопатической коррекции.

Ключевые слова: диафрагма, искусственная вентиляция легких, внешнее дыхание, дисфункция диафрагмы, остеопатическая коррекция

Источник финансирования. Исследование не финансировалось каким-либо источником.

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Статья поступила: 01.09.2024

Статья принята в печать: 26.12.2024

Статья опубликована: 31.03.2025

*** Для корреспонденции:**

Юлия Павловна Потехина

Адрес: 603005 Россия, Нижний Новгород,
пл. Минина и Пожарского, д. 10/1, Приволжский
исследовательский медицинский университет
E-mail: newtmed@gmail.com

*** For correspondence:**

Yulia P. Potekhina

Address: Privolzhsky Research Medical University,
bld. 10/1 Minin and Pozharsky sq.,
Nizhny Novgorod, Russia 603005
E-mail: newtmed@gmail.com

Для цитирования: Толмачев К. М., Потехина Ю. П. Функции диафрагмы и их нарушение при искусственной вентиляции легких (обзор литературы). Российский остеопатический журнал. 2025; 1: 125–140. <https://doi.org/10.32885/2220-0975-2025-1-125-140>

For citation: Tolmachev K. M., Potekhina Yu. P. Diaphragm functions and their disorder during artificial ventilation of the lungs (literature review). Russian Osteopathic Journal. 2025; 1: 125–140. <https://doi.org/10.32885/2220-0975-2025-1-125-140>

UDC 615.828+615.816:616.26
<https://doi.org/10.32885/2220-0975-2025-1-125-140>

© Konstantin M. Tolmachev,
Yulia P. Potekhina, 2025

Diaphragm functions and their disorder during artificial ventilation of the lungs (literature review)

Konstantin M. Tolmachev¹, Yulia P. Potekhina^{2,3,*}

¹ City Clinical Hospital named after S.S. Yudin
bld. 4 Kolomenskiy proezd, Moscow, Russia 115446

² Institute of Osteopathy
bld. 1 lit. A ul. Degtyarnaya, Saint-Petersburg, Russia 191024

³ Privolzhsky Research Medical University
bld. 10/1 Minin and Pozharsky sq., Nizhny Novgorod, Russia 603005

The aim of this review was to systematize the functions of the diaphragm and their disorders occurring during artificial lung ventilation, as well as to evaluate the possibilities of their osteopathic correction. The diaphragm is not only the main respiratory muscle, but also takes part in the functioning of cardiovascular, digestive and other systems of the body, including the central nervous system. Consequently, dysfunctions of the diaphragm negatively affect the condition of the entire body. They can be formed for various reasons, including in patients who are on artificial lung ventilation for a long time. Instrumental diagnosis of diaphragm dysfunction has not been developed, but osteopathic physicians have techniques for both diagnosis and correction of diaphragm dysfunction. There are relatively few publications proving the positive effect of osteopathic correction on external respiratory function. Osteopathic treatment of the diaphragm has potential benefit in reducing the time patients spend on ventilator and their rehabilitation afterwards. No such studies were found in the available literature, but they are highly relevant and may open new perspectives for the application of osteopathic correction.

Key words: *diaphragm, artificial ventilation of the lungs, external respiration, diaphragm dysfunction, osteopathic correction*

Funding. The study was not funded by any source.

Conflict of interest. The authors declare no obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

The article was received 01.09.2024

The article was accepted for publication 26.12.2024

The article was published 31.03.2025

Введение

Одна из важнейших жизненных функций — легочное дыхание, а основной дыхательной мышцей является диафрагма (грудобрюшная преграда). Искусственная вентиляция легких (ИВЛ) — наиболее распространенная методика жизнеобеспечения, применяемая в отделениях реанимации и палатах интенсивной терапии. ИВЛ выполняет заместительную функцию легких, механически поддерживая процесс внешнего дыхания, доставляя к альвеолам кислород и удаляя углекислоту.

На работу дыхательной мускулатуры в норме тратится 2–3 % от всего потребляемого кислорода. При физической работе эта доля может увеличиваться до 10–15 %. При патологии легких, особенно рестриктивной, на работу дыхательных мышц может расходоваться до 30–40 %, а при тяжелой дыхательной недостаточности — до 90 % всего поглощаемого кислорода [1]. В этом случае ИВЛ, снижающая работу дыхательных мышц, становится жизненноспасительной процедурой.

Совершенствование методов интенсивной терапии, поддержания жизненных функций организма ведет к пропорциональному увеличению количества пациентов, которым проводят ИВЛ

и, соответственно, ее длительности. В последние годы отмечено увеличение числа пациентов, нуждающихся в продленной ИВЛ, несмотря на стабилизацию их общего состояния [2]. Во время эпидемии COVID-19 у пациентов с тяжелой пневмонией ИВЛ проводили примерно в половине случаев, а длительность нахождения пациентов на ИВЛ составляла 5–46 сут [3].

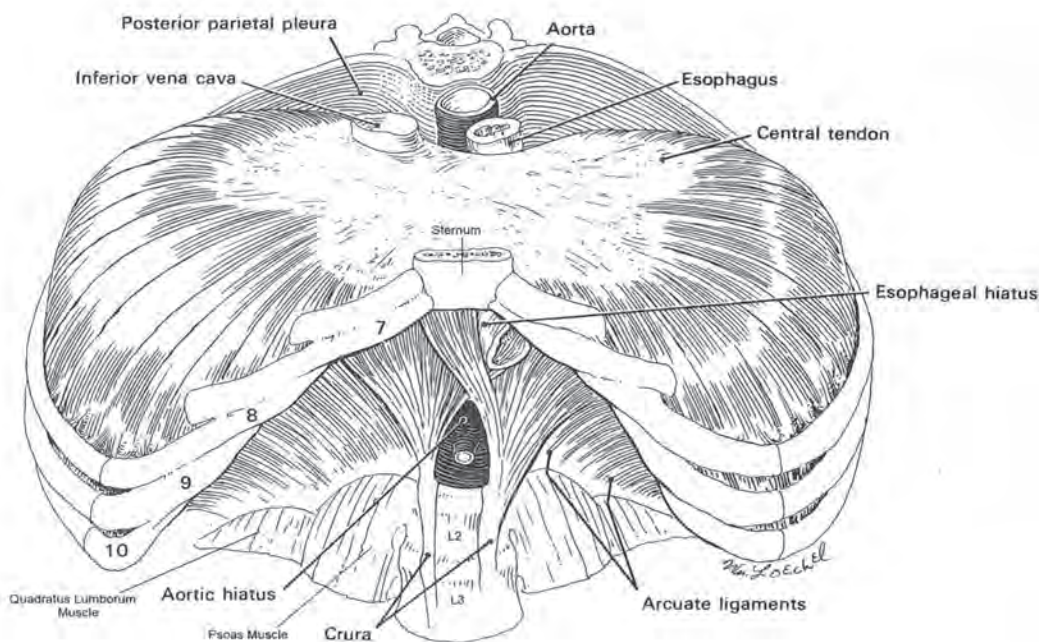
Существующие объективные сложности в оценке способности пациента дышать самостоятельно нередко приводят к повторному подключению аппарата ИВЛ. По данным литературы, каждый пятый экстубированный пациент нуждался в повторном переводе на ИВЛ [4], при этом летальность повторно интубированных и переведенных на ИВЛ пациентов в 2,5–10 раз выше, чем у тех, которым повторную интубацию не проводили [5]. Доля успешно переведенных на самостоятельное дыхание и экстубированных пациентов составляет 59–67 %, с трудным отлучением от ИВЛ — 20–26 % и с длительным ИВЛ — 13–15 % [6–8].

Соответственно, актуальными становятся поиски причин продленной ИВЛ и пути решения проблемы перевода пациентов на эффективное самостоятельное дыхание. Так как во время ИВЛ на вдохе создается положительное давление в грудной полости в отличие от отрицательного давления во время нормального дыхания, то можно предположить формирование дисфункций диафрагмы, которые могут быть убраны при помощи остеопатической коррекции.

Цель обзора — систематизировать функции диафрагмы и их нарушения, возникающие при ИВЛ, а также оценить возможности их остеопатической коррекции.

Анатомия диафрагмы

Диафрагма — это сухожильно-мышечная перегородка между грудной и брюшной полостями. К точкам прикрепления диафрагмы относятся мечевидный отросток грудины, нижние шесть ребер, первых три поясничных позвонка, имеются фасциальные связи с квадратной и поясничной мышцами (рисунок). Мышечные и сухожильные волокна диафрагмы формируют левый и правый



Диафрагма [11]

Diaphragm [11]

купола. В переднезадней проекции передняя часть правого купола диафрагмы расположена на уровне V–VI ребер, задняя его часть — на уровне X ребра. Левый купол диафрагмы расположен на один межреберный промежуток выше правого [9]. Через диафрагму проходят пищевод, аорта, нижняя полая вена, блуждающий нерв, внутренностные нервы, непарная и полунепарная вены и лимфатический проток [10].

В соответствии с местами прикрепления, выделяют реберную, поясничную, грудинную части диафрагмы и ее сухожильный центр. Грудинная часть начинается двумя небольшими пучками волокон от задней поверхности мечевидного отростка. Реберная часть диафрагмы начинается на внутренней поверхности нижних шести ребер и ее волокна переплетаются с волокнами поперечной мышцы живота. Поясничная часть диафрагмы состоит из медиальных, промежуточных и латеральных ножек. Правая медиальная ножка, более толстая и длинная, заканчивается сухожилием на передней поверхности поясничных позвонков (L_{II-III} , L_{IV}). Левая медиальная ножка заканчивается сухожилием на поясничных позвонках L_{II-III} . На уровне грудного позвонка Th_{XI} медиальные ножки своими внутренними поверхностями ограничивают отверстие, через которое проходит пищевод и блуждающий нерв. Между наружной поверхностью латеральных ножек и промежуточными ножками проходят большой внутренностный нерв, непарная (справа) и полунепарная (слева) вены. Сухожилия промежуточных ножек на уровне грудного позвонка Th_{XII} образуют срединную дугообразную связку, через которую проходит аорта и грудной лимфатический проток. Латеральные ножки формируют две сухожильных дуги: медиальную дугообразную связку (над поясничной мышцей) и латеральную дугообразную связку (над квадратной мышцей поясницы), соединяющую поперечный отросток поясничного позвонка L_I и верхушку XII ребра. Медиальная и латеральная дугообразные связки действуют как мост между грудопоясничной фасцией сзади и поперечной фасцией спереди. В диафрагмальном центре нижняя полая вена проходит через отверстие, расположенное спереди справа. Верхняя диафрагмальная поверхность покрыта легочной плеврой, тогда как нижняя поверхность покрыта брюшиной [11, 12].

Движения диафрагмы влияют на подвижность органов, которые имеют с ней соединительнотканые связи, — сердца, легких, вилочковой железы, печени, желудка, кишечника [12, 13]. Исходя из концепции фасциального единства тела человека, наиболее значимыми связями диафрагмы считаются грудопоясничная фасция, которая в своей краниальной части имеет тесные связи с подзатылочными мышцами, а через них — с твердой мозговой оболочкой [14]. Нижние отделы грудопоясничной фасции переходят в миофасциальные структуры тазового дна [14, 15].

Диафрагмальные связки представляют собой структуры, соединяющие диафрагму с внутренними органами:

- нижняя легочная связка представляет собой плевральное утолщение, соединяющее диафрагму с основанием легких;
- диафрагмально-перикардальная связка соединяет диафрагму с перикардом и сердцем;
- диафрагмально-пищеводная связка соединяет пищевод, диафрагму и состоит из рыхлой соединительной ткани;
- печеночные связки, то есть серповидная и правая, левая треугольные, представляют собой поддиафрагмальное утолщение брюшины;
- диафрагмально-ободочная связка соединяет диафрагму с углом восходящей ободочной кишки;
- связка Трейтца состоит из мышечных трактов, которые идут от левой ножки диафрагмы к двенадцатиперстно-тощекишечному углу.

Также стоит упомянуть капсулу Глиссона печени, находящуюся в плотном контакте с сухожильным центром диафрагмы [12].

Диафрагма активна в течение всей жизни организма и поэтому имеет целый ряд особенностей строения мышечных волокон, кровоснабжения и нейрорегуляции. Она состоит из мышечного

и сухожильного компонентов. Мышечный компонент представлен как медленными, низкоутомляемыми волокнами I типа, так и быстрыми волокнами IIb типа, что обеспечивает выносливость, силу и скорость сокращению диафрагмы [16]. Мышечные волокна всех отделов сходятся в сухожильном центре диафрагмы.

Иннервация диафрагмы осуществляется диафрагмальным нервом (*n. phrenicus*) с ядрами, расположенными в передних рогах C_{III-V} шейных сегментов спинного мозга, которые имеют связи с нейронами дыхательного центра продолговатого мозга. *N. phrenicus* — смешанный нерв: двигательными ветвями он иннервирует диафрагму, его чувствительные ветви идут к плевре и перикарду. Некоторые из конечных ветвей нерва проходят сквозь диафрагму в брюшную полость (*nn. phrenicoabdominales*) и анастомозируют с симпатическим сплетением диафрагмы, посылая веточки к брюшине, связкам печени и к самой печени. Вследствие этого при патологических процессах в печени, желчном пузыре и других органах брюшной полости может возникнуть френитус-симптом. *N. phrenicus* принимает волокна от двух нижних шейных узлов симпатического ствола. Своими волокнами в грудной полости он снабжает сердце, легкие, вилочковую железу, а в брюшной он связан с чревным сплетением. В поддиафрагмальной части *n. phrenicus* образует диафрагмальные ганглии, которые могут соединяться с симпатическими ганглиями и надпочечниками. В этих френальных ганглиях находятся симпатические нейроны, и есть доказательства того, что ретроградная система информации от симпатических ганглиев возвращается к диафрагмальному нерву, влияя на работу диафрагмы [9, 10, 17, 18].

Внешнее дыхание

В основе биомеханики дыхания лежит работа дыхательных мышц. При спокойном вдохе увеличение объема легких идет за счет расширения грудной клетки, которое происходит в результате работы диафрагмы и наружных межреберных мышц. Ребра соединены с телами и поперечными отростками позвонков, образуя суставы. В результате сокращения инспираторных мышц, ребра поднимаются, увеличивая размеры грудной клетки как в боковом, так и переднезаднем направлении. За счет конфигурации суставов, оси вращения верхних и нижних ребер отличаются. Таким образом, при вдохе верхние отделы грудной клетки преимущественно увеличиваются в переднезаднем направлении, а нижние — в боковом. В результате, легкие расширяются, давление в них становится ниже атмосферного, и воздух входит через воздухоносный путь вследствие разницы давлений.

При форсированном вдохе включаются вспомогательные мышцы, крепящиеся к плечевому поясу, черепу и позвоночнику, — грудинно-ключично-сосцевидные, большая и малая грудные, лестничные и передние зубчатые. Для того, чтобы эти мышцы начали работать, необходима фиксация участков их прикрепления. Типичное вынужденное положение пациента с затрудненным дыханием — с опорой руками в неподвижный предмет с фиксацией надплечий [19].

Основную роль в обеспечении вдоха играет реберный отдел диафрагмы. Во время вдоха диафрагма уплощается за счет сокращения ее мышечных волокон, отходит от внутренней поверхности грудной клетки. При этом открываются пространства, называемые реберно-диафрагмальными синусами, благодаря чему участки легких, расположенные в области этих синусов, расширяются и хорошо вентилируются [20].

Спокойный выдох происходит пассивно, за счет эластичности грудной клетки и ткани легких, внутрибрюшного давления. Эластические свойства легких определяются не только свойствами легочной ткани, но и силами поверхностного натяжения в стенках альвеол. В результате эластической тяги легких в межплевральном пространстве, заполненном жидкостью, создается давление ниже атмосферного. На высоте вдоха внутриплевральное давление ниже атмосферного примерно на 8 см вод. ст., а в конце выдоха — на 5 см вод. ст. [20].

При форсированном выдохе включаются экспираторные мышцы: внутренние межреберные, наружная и внутренняя косые мышцы живота, поперечная и прямая мышцы живота, а также

мышцы, сгибающие позвоночник [19]. На выдохе давление в легких становится выше атмосферного, и воздух выходит вследствие разницы давлений.

Ритмическая активность нейронов дыхательного центра осуществляется автоматически, но в то же время их активность модулируется под воздействием информации, поступающей от периферических рецепторов (хеморецепторы каротидных синусов и дуги аорты, механорецепторы растяжения легких и дыхательных мышц и другие) и центральных структур (пневмотаксический центр моста, гипоталамус, лимбическая система, кора больших полушарий). Главная цель регуляции дыхания состоит в том, чтобы легочная вентиляция соответствовала метаболическим потребностям организма. Так, при большей физической нагрузке требуется больше кислорода. При осуществлении таких рефлексов, как глотательный, кашлевой, чихательный, и определенных видов деятельности (речь, пение, смех) характер дыхания также меняется [19].

В настоящее время механизм формирования нейрореспираторных паттернов до конца не изучен. Существуют многочисленные нейрональные связи, регулирующие дыхание при таких состояниях, как боль, температурное воздействие, изменение артериального давления, изменение гормонального фона [20].

Недыхательные функции диафрагмы

Диафрагма, помимо дыхания, участвует во многих физиологических процессах — кашле, чихании, рвоте, дефекации, мочеиспускании, глотании и фонации. Она стимулирует венозный и лимфатический возврат к сердцу за счет снижения давления в грудной полости на вдохе — так называемое присасывающее действие. Кроме того, на вдохе мышечные волокна диафрагмы раскрывают отверстие нижней полой вены, которое приобретает четырехугольную форму. На выдохе отверстие нижней полой вены частично закрывается и играет роль псевдоклапана, не давая венозной крови стекать вниз [21].

Диафрагма оказывает влияние на функционирование различных органов и систем. Она создает правильное соотношение между желудком и пищеводом для предотвращения гастроэзофагеального рефлюкса [22]. Являясь своего рода «площадкой», на которой лежит сердце и к которой крепится перикард, диафрагма способствует созданию отрицательного давления в полости перикарда во время систолы и мощного присасывания венозной крови в полости сердца во время диастолы [23].

Движение диафрагмы способно перемещать головной и спинной мозг и влиять на движение спинномозговой жидкости (ликвора), а также увеличивать его выработку, в частности при форсированном дыхании. Во время вдоха происходит краниальное возвращение центральной нервной системы, а при выдохе происходит движение в каудальном направлении [24]. Во время вдоха внутригрудное давление снижается, что влияет на субарахноидальное пространство через венозное сплетение внутри позвоночного канала и способствует лучшей реабсорбции ликвора [25]. Показано, что существует связь между хроническим снижением диафрагмальной функции и снижением когнитивных функций при хронической обструктивной болезни легких, что может быть связано не только с изменением содержания кислорода и углекислого газа в крови, но и с замедлением движения ликвора [26].

Дыхание модулирует электрическую активность лимбической системы, когнитивные и моторные функции коры головного мозга. Этот процесс происходит с большей силой, когда вдох происходит через нос. Обонятельная луковица и грушевидная кора колеблются во время дыхания, вероятно координируя корковую нейронную сеть, связанную с обучением, памятью и поведением [27]. Тип дыхательного ритма создает специфические нервные возбуждения (паттерн дыхания — глубина дыхания, число вдохов, скорость вдохов и выдохов), которые формируют зеркальные колебательные ритмы, распространяющиеся в разных областях мозга, не обязательно связанные с запахом. В основном это низкочастотные колебания — дельта (1–3 Гц), тета (4–12 Гц) [28, 29]. Диафрагма

может влиять на электрическую активность мозга через ритмичные раздражения проприо- и интерорецепторов, которые активизируют соматосенсорную и островковую кору [30]. Прямая стимуляция диафрагмы, особенно при активации тета-волн, всегда стимулирует познавательную активность [31]. Диафрагма стимулирует лимбический ритмогенез, вовлекая большое количество клеток, которые деполяризуются синхронно, начиная с сенсорных медуллярных путей (проприоцепция и интероцепция). С помощью этого механизма мы можем легче запоминать жесты (благодаря связи с гиппокампом) [32].

Диафрагма играет определенную роль в поддержании постурального баланса и правильной осанки, при передвижении в пространстве и движениях верхних конечностей [33]. Сокращение диафрагмы возбуждает дыхательные области коры М1, в которых присутствуют зоны активации мускулатуры конечностей. Вероятно, такая близость позволяет активизировать мышцы конечностей, улучшать их координацию и силу [30]. Глубокий вдох способен увеличить силу мышц руки примерно на 10 % по сравнению с неглубоким или форсированным дыханием. При хронической обструктивной болезни легких отмечено нарушение координации движений [22].

Таким образом, можно заключить, что дисфункции диафрагмы могут сказываться на работе всего организма [34]. Причины этой дисфункции могут быть разнообразны, и одна из них — ИВЛ.

Неблагоприятные влияния искусственной вентиляции легких на организм

В настоящее время выделяют варианты повреждения легких при ИВЛ — неадекватное увлажнение, баротравма, волюмотравма, ателектотравма, биотравма, токсичность кислорода.

У здорового человека при дыхании через нос происходит согревание воздуха до 37 °С и увлажнение до 100 % относительной влажности, что соответствует 44 мг/л абсолютной влажности. Ежедневные потери здорового человека при самостоятельном дыхании через нос составляют около 250 мл воды. Эпителий бронхов и бронхиальные железы непрерывно продуцируют секрет, необходимый для нормальной работы мерцательного эпителия. Недостаточное увлажнение дыхательной смеси при ИВЛ приводит к повышенному испарению воды с поверхности бронхов и трахеи в связи с тем, что увлажнение и согревание вдыхаемого воздуха в полости носа не происходит. Это ведет к увеличению вязкости бронхиального секрета, нарушению работы и повреждению реснитчатого эпителия и, в итоге, к увеличению частоты воспалительных осложнений [35].

Баротравма и волюмотравма — редкое, но возможное осложнение, когда происходит разрыв альвеол на фоне высокого давления в дыхательных путях или проведение ИВЛ большими дыхательными объемами. Ситуация чаще всего встречается у пациентов с ригидной (жесткой) грудной клеткой [1, 35].

Ателектотравма возникает на фоне недостаточного или избыточного увлажнения дыхательной смеси. Нарушение эвакуации бронхиального секрета, изменение количества и качества сурфактанта и эластических свойств легких приводят к слипанию части альвеол с образованием ателектазов. Основным способом профилактики — ИВЛ с положительным давлением в конце вдоха (РЕЕР) [1, 35].

Биотравма — повреждение легких, связанное с выделением в кровь факторов системного воспаления на фоне агрессивной ИВЛ. Часто встречается на фоне асинхронизма в работе аппарата ИВЛ и попыток самостоятельного дыхания пациента. Таким образом замыкается порочный круг, формируется полиорганная недостаточность [36].

Токсичность кислорода: на фоне дыхания 100 % кислородом происходит формирование свободных радикалов, оказывающих повреждающее действие на легкие [1, 35].

ИВЛ оказывает повреждающее действие не только на дыхательную функцию легких, но и на их недыхательные функции. Легкие влияют на общую гемодинамику, изменяя тонус собственных кровеносных сосудов, выделяют в кровь вазоактивные вещества (серотонин, гистамин, брадикинин), участвуют в обмене ангиотензина и простагландинов. Легкие принимают участие в свертывании крови, секретируя ингибитор агрегации тромбоцитов, удаляя из кровотока продукты деградации

фибрина. В легких происходит согревание или охлаждение вдыхаемого воздуха (в зависимости от его температуры), а испарение воды с огромной поверхности альвеол служит теплоотдаче. Легкие принимают участие в общем метаболизме, синтезируют фосфолипиды, регулируют *pH* внутренней среды. Они очищают кровь от крупных молекул, агрегатов клеток, микротромбов, бактерий, пузырьков газа и жира [37].

В процессе нормального вдоха за счет работы дыхательных мышц происходит снижение давления в грудной полости, что оказывает присасывающее действие на кровь в полых венах, происходит увеличение ударного объема, а давление в системе легочной артерии уменьшается. При ИВЛ ситуация меняется на противоположную. В процессе аппаратного вдоха давление в дыхательных путях и плевральной полости повышается. Увеличение внутригрудного давления затрудняет венозный возврат к сердцу, что приводит к снижению сердечного выброса. Увеличение внутриальвеолярного давления приводит к сдавлению легочных капилляров, повышается легочное сосудистое сопротивление, нарушается работа правого желудочка. При этом преднагрузка левого желудочка увеличивается, что приводит к несоответствию в работе правых и левых отделов сердца [38, 39].

Ошибки в выборе параметров ИВЛ приводят к так называемому вентилятор-ассоциированному повреждению легких, которое сопровождается ухудшением механических свойств легких, неравномерным распределением вентилируемых участков и участков легких с хорошим кровоснабжением (вентиляционно/перфузионное отношение) [39, 40].

Таким образом, необходимость проведения ИВЛ как процедуры, направленной на спасение жизни пациента и сохранение функции легких, сочетается с большим количеством осложнений, непосредственно связанных с самой процедурой. Чем дольше пациент находится на ИВЛ, тем более выраженными становятся описанные нарушения. Это вынуждает врачей искать пути оптимизации длительности и способов проведения ИВЛ для снижения связанных с ней рисков.

Основные причины длительной искусственной вентиляции легких

Основная причина длительной ИВЛ — снижение силы и выносливости диафрагмы и дыхательных мышц. Атрофия дыхательных мышц начинается уже через 18 ч ИВЛ [41], а сократительная слабость диафрагмы развивается спустя 2 ч принудительной вентиляции [42].

В 2004 г. был предложен термин «ИВЛ-индуцированная дисфункция диафрагмы», которая является одной из причин продленной ИВЛ. Под этим термином понимают сочетание атрофии и слабости сократительной функции диафрагмы, вызываемых непосредственно длительной ИВЛ. Ее клиническая картина характеризуется нарушением механики дыхания и неудачными попытками перевести пациента на самостоятельное дыхание при отсутствии других причин респираторных нарушений [43, 44]. Диафрагмальная дисфункция встречается у 60–80% пациентов реанимационных отделений [45].

В настоящее время существуют различные объяснения этиологии и патогенеза диафрагмальной дисфункции, связанной с длительной ИВЛ. К ним относят нарушение микроциркуляции в диафрагме на фоне увеличенной нагрузки [46], пассивное растяжение мышечных волокон, развитие митохондриальной недостаточности и оксидативного стресса [47], развитие полинейропатии и миопатии критических состояний [48]. Но, несмотря на различные гипотезы, механизм дисфункции диафрагмы до конца не ясен [49].

А.Ф. Беляев и соавт. (2021) проводили обследование пациентов, перенесших коронавирусную пневмонию. Глобальные соматические дисфункции были диагностированы у 78,4% пациентов (преимущественно нейродинамические и ритмогенные нарушения), региональные соматические дисфункции — у 87,6% (преимущественно грудного региона, структуральная и висцеральная составляющие), локальные — у 98,8% (дисфункции позвоночника, ребер, диафрагмы). У этих пациентов формируются патологические паттерны дыхания (длительность фаз, глубина дыхания,

динамика давления и потоков в воздухоносных путях), чаще всего — синдром гипервентиляции с глубокими вдохами и форсированными выдохами, также характерны торакальное (апикальное) доминантное дыхание и грудобрюшная асинхрония. Авторы считают, что это можно объяснить как нарушением центрального ритмогенеза (дисфункции дыхательных нейронов), так и биомеханическими нарушениями — соматическими дисфункциями ребер, грудины, позвоночных двигательных сегментов, вызванными иммобилизацией, гиподинамией, местной тканевой гипоксией (застой крови в легких при длительном положении лежа) с быстрым развитием дистрофического процесса и мышечно-фасциальных контрактур [50].

Методы диагностики дисфункции диафрагмы

Диагностика дисфункций диафрагмы представляет пока нерешенную проблему. В настоящее время предпринимаются попытки оценить функцию диафрагмы методом измерения трансдиафрагмального давления как при спонтанном дыхании, так и на фоне стимуляции диафрагмального нерва [51, 52]. Однако это исследование требует специальных баллонных зондов, что не всегда доступно в рутинной лечебной практике. В ряде случаев оценка электрической активности диафрагмы возможна при помощи внутрипищеводного датчика [53].

Наиболее простым способом оценки работы диафрагмы в настоящее время является ультразвуковая диагностика. Предложена методика измерения толщины диафрагмы для оценки ее функционального состояния и готовности пациента дышать самостоятельно [54]. Тем не менее, существующие ультразвуковые и рентгенографические методы оценки работы диафрагмы требуют специальной подготовки и оператор-зависимы [51].

С точки зрения остеопатии, подвижность диафрагмы тесно связана со всеми висцеральными структурами [20, 55, 56]. Находясь в тесном мышечно-фасциальном взаимодействии с окружающими органами, дисфункция диафрагмы может сопровождаться шейными и поясничными болями, нарушениями функции желудочно-кишечного тракта [13]. Состояние диафрагмы меняется на фоне изменений и в психическом статусе пациента [55].

При проведении мануальной диагностики диафрагмальных дисфункций ключевым навыком является знание анатомии и физиологии. В настоящее время существует несколько различных методик обследования диафрагмы. Купол диафрагмы и центральное сухожилие можно оценить через реберные дуги. Малоподвижная диафрагма с фиксацией на вдохе говорит о ее спазме. Ножки диафрагмы возможно пропальпировать в треугольнике Лесгафта–Грюнфельта, расположенном между мышцами-разгибателями позвоночника, квадратной мышцей поясницы и нижним краем XII ребра [57].

Наиболее полная методика обследования диафрагмы представлена в работе В. Bordoni (2016) и соавт., в которой он объединил опыт более чем 20-летней работы с пациентами, страдающими заболеваниями дыхательной и сердечно-сосудистой систем [33].

1. Положение пациента лежа на спине. На первом этапе происходит оценка подвижности ребер на вдохе и выдохе. Руки расположены на ребрах, на боковых частях грудной клетки. В случае дисфункции диафрагмы движение ребер обычно ограничено.
2. На следующем этапе руки перемещают на реберные дуги, большие пальцы лежат по краю реберной дуги, остальные пальцы расположены на вышележащих ребрах. Оценивают не только движение ребер, но и подвижность диафрагмы.
3. Далее обследуют отдельные участки диафрагмы — купол, заднебоковую часть, область мечевидного отростка, область латеральных и медиальных ножек.
4. При обследовании купола диафрагмы предплечье врача находится параллельно животу пациента, тенары и гипотенары расположены на уровне переднего края реберной дуги. Врач оказывает мягкое давление в краниальном направлении, чтобы обнаружить упругий тканевой ответ как с правой, так и с левой стороны.

5. При обследовании заднебоковой области рука врача расположена так же, как и для обследования купола диафрагмы, но предплечье образует угол с животом пациента 45° . Врач оказывает мягкое давление по оси своего предплечья. Исследование проводят с двух сторон. Эта область диафрагмы, по сравнению с куполами, во время дыхания двигается с большей скоростью и имеет более вертикальный наклон.
6. Обследование области мечевидного отростка проводят по аналогичной схеме. Предплечье врача параллельно животу пациента, область тенора и гипотенара — на мечевидном отростке. Врач, оказывая мягкое давление в краниальном направлении, оценивает подвижность тканей на вдохе и выдохе. В случае дисфункции диафрагмы эта область становится жесткой.
7. При обследовании медиальных ножек диафрагмы оценивают состояние позвоночника пациента в положении лежа на спине. Врач кладет дистальные фаланги пальцев в межостистые промежутки грудных позвонков Th_{XI-XII} , выполняя мягкое давление, производя пассивную экстензию, получая информацию об эластичности пальпируемой зоны. Технику применяют для оценки эластичности до уровня поясничного позвонка L_{IV} .
8. Латеральные ножки диафрагмы обследуют через последнее ребро. Положение пациента лежа на спине. Врач располагается сбоку, на противоположной от обследуемой области стороне. Врач захватывает ребро снизу и мягко подтягивает его в свою сторону.

Основная цель исследования — оценить подвижность разных отделов диафрагмы. Это позволяет составить план лечения и последующей физической реабилитации. Кроме того, так как дыхание контролируется дыхательным центром, расположенным в стволе головного мозга и шейных сегментах, исследование этой зоны представляется целесообразным в рамках диагностики и лечения дыхательных нарушений [57].

Таким образом, принимая во внимание нефизиологический характер дыхания на фоне ИВЛ, представляет интерес оценка дыхательной дисфункции с точки зрения остеопатического обследования у реанимационных пациентов. В первую очередь это касается дисфункции диафрагмы как основной дыхательной мышцы.

Методы коррекции дисфункции диафрагмы

В настоящее время работа над созданием протоколов реабилитации после отлучения пациента от аппаратного дыхания не закончена. Работы в основном ведутся в разработке различных режимов вспомогательной вентиляции легких, поддерживающих и стимулирующих самостоятельное дыхание пациента. Особую роль в создании протоколов дыхательной реабилитации отдается упражнениям на увеличение силы и выносливости дыхательных мышц [58]. Отмечается, что комплексные программы реабилитации особенно важны для пациентов отделений реанимации [59].

Предпринимались попытки влияния на функцию диафрагмы методами внешнего механического воздействия. Интерес представляет работа, посвященная высокочастотной осцилляции грудной клетки при длительной ИВЛ специальным жилетом [60].

Для ускорения реабилитации после длительной ИВЛ предложены различные системы для электрической стимуляции диафрагмальных нервов. Предлагается имплантировать электроды к диафрагме интраоперационно. Дальнейшая ежедневная стимуляция диафрагмы увеличивает дыхательный объем в среднем на 37 %, что уменьшает ателектазирование легочной ткани и атрофию диафрагмы, нивелирует гиповентиляцию и способствует сокращению сроков респираторной поддержки у ряда пациентов [61], однако выбор таких больных остается предметом для дискуссии. Еще один из возможных методов — шейный доступ к диафрагмальным нервам для их электрической стимуляции — также показал свою безопасность и возможность применения [62].

Исследований с использованием остеопатического обследования у пациентов реанимационных отделений с точки зрения остеопатических дисфункций в настоящее время не проводилось

либо они носят фрагментарный характер. С другой стороны, некоторые авторы говорят об эффективности остеопатического лечения дыхательных нарушений и непосредственной связи дыхания с центральной нервной системой [63, 64]. Потенциальная польза остеопатического лечения в рамках дыхательной реабилитации видится перспективной.

Особый интерес представляет рандомизированное исследование по увеличению дыхательного объема у больных с хронической обструктивной болезнью легких методом мануального воздействия на подвижность диафрагмы. Результатом лечения было статистически значимое увеличение подвижности диафрагмы, объема вдоха и показателей теста 6-минутной ходьбы [65]. Увеличение дыхательного объема в ответ на растяжение диафрагмы отмечали и в исследовании на добровольцах [66].

После однократной процедуры остеопатической коррекции (ОК) у пациентов, перенесших ковид-пневмонию, отмечено статистически значимое улучшение функции внешнего дыхания, проявившееся в увеличении жизненной ёмкости легких с 78 ± 3 до $85 \pm 3,4$ % от должной ($p=0,0006$). Количество пациентов, имевших локальные соматические дисфункции, в том числе диафрагмы, снизилось с 98,8 до 17,7 %. Все пациенты отмечали уменьшение проявлений симптомов дыхательного дискомфорта и одышки [50].

В мультицентровом рандомизированном контролируемом исследовании применения ОК при пневмонии в пожилом возрасте изучали длительность пребывания и смертность в больнице. Участники были случайным образом распределены в одну из трех групп, которые получили дополнительный протокол ОК ($n=130$), протокол легкого прикосновения ($n=124$) или только стандартное лечение ($n=133$). Длительность пребывания в больнице была меньше в группе ОК по сравнению с другими группами ($p=0,006$). В подгруппе старшего возраста внутрибольничная смертность была ниже в группах ОК [1 из 66 (2 %)] и легкого прикосновения [2 из 68 (3 %)], чем в группе стандартного лечения [9 из 67 (13 %)], $p=0,005$. Группа ОК имела более низкую частоту дыхательной недостаточности, зависящую от аппарата ИВЛ, чем в группе стандартного лечения [0 из 40 (0 %) против 5 из 50 (10 %), $p=0,05$] [65].

Сравнительная оценка различных мануальных техник воздействия на диафрагму показывает их эффективность при лечении заболеваний, связанных с нарушением функции дыхания [67, 68]. Воздействовать на подвижность диафрагмы и грудной клетки в целом возможно различными мануальными техниками. К ним относятся как высокоскоростные и низкоамплитудные, так и различные виды артикуляционных и миофасциальных техник. Воздействие на диафрагму улучшает не только дыхание, но благотворно влияет на кровообращение и лимфоток [56, 69]. Положительный эффект мануальных техник мобилизации ребер и грудного отдела позвоночника на дыхание, гемодинамику и лимфоток отмечен при комплексном лечении обструктивных заболеваний легких [68, 70, 71].

В работе S. Yao и соавт. (2014) проанализированы рандомизированные исследования по эффективности использования мануальных техник в комплексном лечении пневмонии и предложена остеопатическая методика воздействия на ребра, легкие и диафрагму. Методика включает коррекцию дыхательной дисфункции I ребра («вдоховой» или «выдоховой») методом постизометрического мышечного расслабления, в первую очередь грудино-ключично-сосцевидных и лестничных мышц. Улучшение подвижности I ребра способствует увеличению подвижности грудной клетки и способствует лимфатическому дренажу за счет освобождения области впадения лимфатических сосудов в подключичные вены. На втором этапе предлагаемой методики рекомендовано проведение «куполизации» диафрагмы (doming), что также способствует увеличению объема дыхания и лимфоотoku от легких. Следующим этапом авторы рекомендуют провести технику поднятия ребер в качестве элемента, нормализующего вегетативный тонус региона. В заключение рекомендовано проведение помпажа грудной клетки. Статья сопровождается видеоинструкцией [72].

В статье В. Bordoni и соавт. (2015), принимая во внимание тесные фасциальные, сосудистые и нервные связи грудобрюшной преграды с другими диафрагмами тела, предлагают комплексную диагностику и лечение пяти диафрагм — намета мозжечка, области дна рта, верхней грудной апертуры, грудобрюшной диафрагмы и тазового дна [18].

Закономерно предположить, что пребывание пациента в реанимационном отделении на ИВЛ связано с сильнейшим стрессорным воздействием, влиянием на подвижность диафрагмы, активацией симпатической нервной системы. Воздействием на диафрагму, в свою очередь, возможно добиться снижения тонуса симпатической и активации парасимпатической нервной системы. Этому способствуют фасциальные техники лифта ребер, затылочно-крестцовое уравнивание, компрессия IV желудочка (CV4), высвобождение солнечного сплетения [57, 72].

Заключение

Диафрагма является не только главной дыхательной мышцей, но принимает участие в функционировании сердечно-сосудистой, пищеварительной и других систем организма, включая центральную нервную систему. Следовательно, дисфункции диафрагмы негативно отражаются на состоянии всего организма. Они могут формироваться по разным причинам, в том числе у пациентов, длительно находящихся на искусственной вентиляции легких.

Инструментальная диагностика дисфункций диафрагмы не разработана, но врачи-osteопаты владеют техниками их диагностики и коррекции. Остеопатическое воздействие на диафрагму имеет потенциальную пользу для сокращения времени пребывания пациентов на искусственной вентиляции легких и их реабилитации после. В доступной литературе таких исследований не найдено, однако они имеют высокую актуальность и могут открыть новые перспективы для применения остеопатической коррекции.

Вклад авторов:

К. М. Толмачев — обсуждение проблемы, обзор публикаций по теме статьи, написание статьи

Ю. П. Потехина — обсуждение проблемы, обзор публикаций по теме статьи, написание и редактирование статьи

Авторы одобрили финальную версию статьи для публикации, согласны нести ответственность за все аспекты работы и обеспечить гарантию, что все вопросы относительно точности и достоверности любого фрагмента работы надлежащим образом исследованы и решены.

Authors' contributions:

Konstantin M. Tolmachev — discussion of the problem, review of publications on the topic of the article, writing the text of the article

Yulia P. Potekhina — discussion of the problem, review of publications on the topic of the article, writing and editing the text of the article

The authors have approved the final version of the article for publication, agree to be responsible for all aspects of the work and ensure that all questions regarding the accuracy and reliability of any fragment of the work are properly investigated and resolved.

Литература/References

1. Чурсин В. В. Искусственная вентиляция легких: Учеб.-метод. пособие. Алматы; 2008. [Chursin V. V. Artificial ventilation of lungs: Training manual. Almaty; 2008 (in russ.)].
2. Zilberberg M. D., Marjolein W., Pirone J. R., Shorr A. F. Growth in adult prolonged acute mechanical ventilation: implications for healthcare delivery. Crit. Care Med. 2008; 36 (5): 1451–1455. <https://doi.org/10.1097/CCM.0b013e3181691a49>
3. Матюшков Н. С., Тюрин И. Н., Авдейкин С. Н., Боярков А. В. и др. Респираторная поддержка у пациентов с COVID-19. Опыт инфекционного госпиталя в Коммунарке: одноцентровое ретроспективное исследование. Вестн. интенсив. тер. им. А. И. Салтанова. 2021; 3: 47–60. <https://doi.org/10.21320/1818-474X-2021-3-47-60>

- [Matiushkov N.S., Tyurin I.N., Avdeikin S.N., Boyarkov A.V. et al. Respiratory support in COVID-19 patients in Kommunar hospital: A single-centered, retrospective study. *Bull. crit. Care.* 2021; 3: 47–60. <https://doi.org/10.21320/1818-474X-2021-3-47-60> (in russ.)].
4. Villalba D., Gil Rossetti G., Scrigna M., Collins J. et al. Prevalence of and risk factors for mechanical ventilation reinstitution in patients weaned from prolonged mechanical ventilation. *Resp. Care.* 2020; 65 (2): 210–216. <https://doi.org/10.4187/respcare.06807>
 5. Rothaar R.C., Epstein S.K. Extubation failure: magnitude of the problem, impact on outcomes, and prevention. *Curr. Opin. Crit. Care.* 2003; 9 (1): 59–66. <https://doi.org/10.1097/00075198-200302000-00011>
 6. Epstein S.K. Weaning from ventilatory support. *Curr. Opin. crit. Care.* 2009; 15 (1): 36–43. <https://doi.org/10.1097/MCC.0b013e3283220e07>
 7. Funk G.C., Anders S., Breyer M.K., Burghuber O.C. et al. Incidence and outcome of weaning from mechanical ventilation according to new categories. *Europ. Resp. J.* 2010; 35: 88–94. <https://doi.org/10.1183/09031936.00056909>
 8. Jeong B.H., Ko M.G., Nam J., Yoo H. et al. Differences in clinical outcomes according to weaning classifications in medical intensive care units. *PLOS ONE.* 2015; 10 (4): e0122810. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0122810>
 9. Roberts H.C. Imaging the diaphragm. *Thorac. Surg. Clin.* 2009; 19 (4): 431–450. PMID: 20112626. <https://doi.org/10.1016/j.thorsurg.2009.08.008>
 10. Downey R. Anatomy of the Normal Diaphragm. *Thorac. Surg. Clin.* 2011; 21: 273–279. <https://doi.org/10.1016/j.thorsurg.2011.01.001>
 11. Greenman Ph.E. Principles of manual medicine. Lippincott Williams & Wilkins; 2003: 613.
 12. Bordoni B., Zanier E. Anatomic connections of the diaphragm: influence of respiration on the body system. *J. Multidiscip. Hlthe.* 2013; 6: 281–291. <https://doi.org/10.2147/JMDH.S45443>
 13. Sagrillo L., Frigo L. The respiratory diaphragm in osteopathic vision: A literature review. *Manual Ther. Posturol. Rehab. J.* 2020; 414 (14): 1–6. <https://doi.org/10.17784/mtprehabjournal.2016.14.0414>.
 14. Bordoni B., Simonelli M. The awareness of the fascial system. *Cureus.* 2018; 10 (10): e3397. <https://doi.org/10.7759/cureus.3397>
 15. Bordoni B. The five diaphragms in osteopathic manipulative medicine: myofascial relationships, part 1. *Cureus.* 2020; 12 (4): e7794. <https://doi.org/10.7759/cureus.7794>
 16. Борзых А.А., Виноградова О.Л., Тарасова О.С. Диафрагма: связь регуляции кровоснабжения с особенностями сократительной функции. *Вестн. МГУ (серия 16 «Биология»).* 2020; 75 (2): 55–64.
[Borzykh A.A., Vinogradova O.L., Tarasova O.S. Diaphragm: relationship between the regulation of blood supply and the characteristics of the contractile function. *Vestn. MGU (seriya 16 «Biologiya»).* 2020; 75 (2): 55–64 (in russ.)].
 17. Loukas M., Du Plessis M., Louis R.G.Jr., Tubbs R.S. et al. The subdiaphragmatic part of the phrenic nerve — morphometry and connections to autonomic ganglia. *Clin. Anat.* 2016; 29 (1): 120–128. <https://doi.org/10.1002/ca.22652>
 18. Bordoni B., Zanier E. The continuity of the body: hypothesis of treatment of the five diaphragms. *J. Altern. Compl. Med.* 2015; 21 (4): 237–242. <https://doi.org/10.1089/acm.2013.0211>
 19. Физиология человека (в 3-х т.). Т. 2 (пер. с англ.) / Под ред. Р. Шмидта и Г. Тевса. М.: МИР; 1996: 313.
[Shmidt R., Tevs G. (eds.) *Human Physiology* (in 3 vols.). Vol. 2. М.: MIR; 1996: 313 (in russ.)].
 20. Fogarty M.J., Sieck G.C. Evolution and functional differentiation of the diaphragm muscle of mammals. *Compr. Physiol.* 2019; 9 (2): 715–766. <https://doi.org/10.1002/cphy.c180012>
 21. Бюске Л. Мышечные цепи. Т. 2. Лордозы, кифозы, сколиозы и деформации грудной клетки. М.–Иваново: МИК; 2011.
[Byuske L. *Muscle circuits*. Vol. 2. Lordoses, kyphoses, scolioses and deformities of the thorax. М.–Ivanovo: MIK; 2011 (in russ.)].
 22. Bordoni B., Marelli F., Morabito B., Sacconi B. et al. Low-back pain and gastroesophageal reflux in patients with COPD: The disease in the breath. *Int. J. Chron. Obstruct. Pulmon. Dis.* 2018; 13: 325–334.
 23. Завьялов А.И., Завьялов Д.А., Завьялов А.А. Сердце — пятикамерная система. Теория и практика физ. культуры. 2005; 6: 23–26.
[Zavyalov A.I., Zavyalov D.A., Zavyalov A.A. The heart is a five-chamber system. *Teoriya i praktika fiz. kultury.* 2005; 6: 23–26 (in russ.)].
 24. Takizawa K., Matsumae M., Sunohara S., Yatsushiro S. et al. Characterization of cardiac- and respiratory-driven cerebrospinal fluid motion based on asynchronous phase-contrast magnetic resonance imaging in volunteers. *Fluids Barriers CNS.* 2017; 14: 25.
 25. Wszedybyl-Winkiewska M., Wolf J., Swierblewska E., Kunicka K. et al. Increased inspiratory resistance affects the dynamic relationship between blood pressure changes and subarachnoid space width oscillations. *PLoS One.* 2017; 12: 179503. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0179503>
 26. Whedon J.M., Glassey D. Cerebrospinal fluid stasis and its clinical significance. *Altern. Ther. Hlth Med.* 2009; 15: 54–60.
 27. Zelano C., Jiang H., Zhou G., Arora N. et al. Nasal respiration entrains human limbic oscillations and modulates cognitive function. *J. Neurosci.* 2016; 36: 12448–12467.

28. Heck D.H., McAfee S.S., Liu Y., Babajani-Feremi A. et al. Breathing as a fundamental rhythm of brain function. *Front Neural. Circ.* 2017; 10: 115. <https://doi.org/10.3389/fncir.2016.00115>
29. Herrero J.L., Khuvis S., Yeagle E., Cerf M. et al. Breathing above the brain stem: volitional control and attentional modulation in humans. *J. Neurophysiol.* 2018; 119: 145–159.
30. Varga S., Heck D.H. Rhythms of the body, rhythms of the brain: respiration, neural oscillations, and embodied cognition. *Consc. Cogn.* 2017; 56: 77–90.
31. Biskamp J., Bartos M., Sauer J.F. Organization of prefrontal network activity by respiration-related oscillations. *Sci. Rep.* 2017; 7: 45508.
32. Tsanov M. Speed and oscillations medial septum integration of attention and navigation. *Front Syst. Neurosci.* 2017; 11: 67.
33. Bordoni B., Marelli F., Morabito B., Sacconi B. Manual evaluation of the diaphragm muscle. *Int. J. Chron. Obstruct. Pulmon. Dis.* 2016; 11: 1949–1956. <https://doi.org/10.2147/COPD.S111634>
34. Bordoni B., Purgol S., Bizzarri A., Modica M. et al. The Influence of Breathing on the Central Nervous System. *Cureus.* 2018; 10 (6): e2724. <https://doi.org/10.7759/cureus.2724>
35. Горячев А.С., Савин И.А. Основы ИВА. М.: МД; 2014.
[Goryachev A.S., Savin I.A. Fundamentals of ventilation. M.: MD; 2014 (in russ.)].
36. Curley G.F., Laffey J., Zhang H. Biotrauma and ventilator-induced lung injury: clinical implications. *Chest.* 2016; 150 (5): 1109–1117. <https://doi.org/10.1016/j.chest.2016.07.019>
37. Понукалина Е.В., Полутова Н.В., Чеснокова Н.П., Бизенкова М.Н. Лекция 2: значение легких в обеспечении внешнего дыхания и недыхательных функций. Науч. обозрение. Мед. науки. 2017; 2: 34–35.
[Ponukalina E.V., Polutova N.V., Chesnokova N.P., Bizenkova M.N. Lecture 2: the importance of the lungs in providing external respiration and non-respiratory functions: Nauch. obozrenie. Med. nauki. 2017; 2: 34-35 (in russ.)].
38. Евлахов В.И., Поясов И.З. Венозный возврат и легочная гемодинамика при искусственной вентиляции легких с положительным давлением в конце выдоха. Мед. akad. журн. 2019; 19 (3): 11–20. <https://doi.org/10.17816/MAJ19311-20>
[Evlakhov V.I., Poyasov I.Z. Venous return and pulmonary hemodynamics during artificial ventilation with positive end-expiratory pressure. Med. akad. zhurn. 2019; 19 (3): 11–20. <https://doi.org/10.17816/MAJ19311-20> (in russ.)].
39. Katira D.H. Ventilator-induced lung injury: Classic and novel concepts. *Resp. Care.* 2019; 64 (6): 629-637. <https://doi.org/10.4187/respcare.07055>
40. Кассиль В.Л., Выжигина М.А., Лескин Г.С. Искусственная и вспомогательная вентиляция легких: Рук. для врачей. М.: Медицина; 2004.
[Kassil V.L., Vyzhigina M.A., Leskin G.S. Artificial and assisted ventilation: Handbook for physicians. M.: Meditsina; 2004 (in russ.)].
41. Levine S., Nguyen T., Taylor N., Friscia M.E. et al. Rapid disuse atrophy of diaphragm fibers in mechanically ventilated humans. *New Engl. J. Med.* 2008; 358 (13): 1327–1335. <https://doi.org/10.1056/NEJMoa070447>
42. Welvaart W.N., Paul M.A., Stienen G.J., van Hees H.W. et al. Selective diaphragm muscle weakness after contractile inactivity during thoracic surgery. *Ann. Surg.* 2011; 254 (6): 1044–1049. <https://doi.org/10.1097/SLA.0b013e318232e75b>
43. Vassilakopoulos T., Petrof B.J. Ventilator-induced diaphragmatic dysfunction. *Amer. J. Resp. Crit. Care Med.* 2004; 169 (3): 336–341. <https://doi.org/10.1164/rccm.200304-489CP>
44. Boon A.J., Meiling J.B., Luetmer M.T., Klein C.J., et al. Paradoxical thinning of the diaphragm on ultrasound is a risk factor for requiring non-invasive ventilation in patients with neuromuscular diaphragmatic dysfunction. *Muscle Nerve.* 2024; 70 (3): 352–359. <https://doi.org/10.1002/mus.28194>
45. Jung B., Moury P.H., Mahul M., de Jong A. et al. Diaphragmatic dysfunction in patients with ICU-acquired weakness and its impact on extubation failure. *Intens. Care Med.* 2016; 42 (5): 853–861. <https://doi.org/10.1007/s00134-015-4125-2>
46. Davis R.T., Bruells C.S., Stabley J.N., McCullough D.J. et al. Mechanical ventilation reduces rat diaphragm blood flow and impairs oxygen delivery and uptake. *Crit. Care Med.* 2012; 40 (10): 2858–2866. <https://doi.org/10.1097/CCM.0b013e31825b933a>
47. Powers S.K., Smuder A.J., Criswell D.S. Mechanistic links between oxidative stress and disuse muscle atrophy. *Antioxid. Redox. Signal.* 2011; 15 (9): 2519–2528. <https://doi.org/10.1089/ars.2011.3973>
48. Hermans G., van den Berghe G. Clinical review: Intensive care unit acquired weakness. *Crit. Care.* 2015; 19 (1): 274. <https://doi.org/10.1186/s13054-015-0993-7>
49. Powers S.K., Wiggs M.P., Sollanek K.J., Smuder A.J. Ventilator-induced diaphragm dysfunction: cause and effect. *Amer. J. Physiol. Regul. Integr. Comp. Physiol.* 2013; 305 (5): R464–R477. <https://doi.org/10.1152/ajpregu.00231.2013>
50. Беляев А.Ф., Харьковская Т.С., Фотина О.Н., Юрченко А.А. Влияние остеопатической коррекции на функцию внешнего дыхания у пациентов, перенесших коронавирусную пневмонию COVID-19. Рос. остеопат. журн. 2021; 4: 8–17. <https://doi.org/10.32885/2220-0975-2021-4-8-17>
[Belyaev A.F., Kharkovskaya T.S., Fotina O.N., Yurchenko A.A. Effect of osteopathic correction on the function of external respiration in patients with COVID-19 coronavirus pneumonia. Russ. Osteopath. J. 2021; 4: 8–17. <https://doi.org/10.32885/2220-0975-2021-4-8-17> (in russ.)].

51. Doorduyn J., van Hees H.W., van der Hoeven J.G., Heunks L.M. Monitoring of the respiratory muscles in the critically ill. *Amer. J. Resp. crit. Care Med.* 2013; 187 (1): 20–27. <https://doi.org/10.1164/rccm.201206-1117CP>
52. Rafferty G.F., Greenough A., Manczur T., Polkey M.I. et al. Magnetic phrenic nerve stimulation to assess diaphragm function in children following liver transplantation. *Pediatr. crit. Care Med.* 2001; 2 (2): 122–126. <https://doi.org/10.1097/00130478-200104000-00005>
53. Yonis H., Crognier I., Conil J-M., Serres I. et al. Patient-ventilator synchrony in Neurally Adjusted Ventilatory Assist (NAVA) and Pressure Support Ventilation (PSV): A prospective observational study. *BMC Anesthesiol.* 2015; 15: 117. <https://doi.org/10.1186/s12871-015-0091-z>
54. DiNino E., Gartman E.J., Sethi J.M., McCool E.D. Diaphragm ultrasound as a predictor of successful extubation from mechanical ventilation. *Thorax.* 2014; 69 (5): 423–427. <https://doi.org/10.1136/thoraxjnl-2013-204111>
55. Courtney R. The functions of breathing and its dysfunctions and their relationship to breathing therapy. *Int. J. Osteopath. Med.* 2009; 12 (3): 78–85. <https://doi.org/10.1016/j.ijosm.2009.04.002>
56. Hruby R.J. The rib cage. In, *Foundations for osteopathic medicine*; Ward RC (2nd ed.). London, Lippincott Williams & Wilkins; 2003: 719–720.
57. Мохов Д.Е., Аптекарь И.А., Белаш В.О., Литвинов И.А., Могельницкий А.С., Потехина Ю.П., Тарасов Н.А., Тарасова В.В., Трегубова Е.С., Устинов А.В. Основы остеопатии: Учебник / Под ред. Д.Е. Мохова. М.: GEOTAR-Media; 2020.
[Mokhov D.E., Aptekar I.A., Belash V.O., Litvinov I.A., Mogelnitskiy A.S., Potekhina Yu.P., Tarasov N.A., Tarasova V.V., Tregubova E.S., Ustinov A.V. Fundamentals of osteopathy: A textbook / D.E. Mokhov (eds.) M.: GEOTAR-Media; 2020 (in russ.)].
58. Завертайло Л.Л., Ермаков Е.А., Семенкова Г.В., Мальков О.А. и др. Прекращение длительной искусственной вентиляции легких (обзор литературы). *Интенсивная терапия.* 2007; 3: 66–79.
[Zavertailo L.L., Ermakov E.A., Semenkova G.V., Malkov O.A. et al. Termination of prolonged mechanical ventilation (literature review). *Intens. Care.* 2007; 3: 66–79 (in russ.)].
59. Jones C., Skirrow P., Griffiths R., Humphris G. et al. Rehabilitation after critical illness: A randomized, controlled trial. *Crit. Care med.* 2003; 31: 2456–2461. <https://doi.org/10.1097/01.CCM.0000089938.56725.33>
60. Chuang M.L., Chou Y.L., Lee C.Y., Huang S.F. Instantaneous responses the high-frequency chest wall oscillation in patients with acute pneumonia respiratory failure receiving mechanical ventilation: A randomized controlled study. *Medicine (Baltimore).* 2017; 96 (9): e5912. <https://doi.org/10.1097/MD.00000000000005912>
61. Onders R., Markovitz A., Ho V.P., Hardacre J. et al. Completed FDA feasibility trial of surgical placed temporary diaphragm pacing electrodes: A promising option to prevent and treat respiratory failure. *Amer. J. Surg.* 2018; 215 (3): 518–521. <https://doi.org/j.amsurg.2017.10.054>
62. Паромов К.В., Свирский Д.А., Киров М.Ю. Лечение дисфункции диафрагмы в послеоперационном периоде кардиохирургического вмешательства: обзор литературы и клинический случай. *Вестн. интенсив. тер. им. А.И. Салтанова.* 2022; 3: 57–68. <https://doi.org/10.21320/1818-474X-2022-3-57-68>
[Paromov K.V., Svirskiy D.A., Kirov M.Yu. Treatment option for diaphragm dysfunction after cardiac surgery: A review and a clinical case. *Bull. crit. Care.* 2022; 3: 57–68. <https://doi.org/10.21320/1818-474X-2022-3-57-68> (in russ.)].
63. Hollie B. Osteopathic management of patients with breathing dysfunction: An exploratory study. *Osteopath. Res. Web.* <https://www.osteopathicresearch.org/s/orw/item/1796>
64. Auer-Rizzi K. Breathing and the Center of Command — the influence of respiration on the Central Nervous System. *Osteopath. Res. Web.*
65. Rocha T., Souza H., Brandão D.C., Rattes C. et al. The Manual Diaphragm Release Technique improves diaphragmatic mobility, inspiratory capacity and exercise capacity in people with chronic obstructive pulmonary disease: A randomised trial. *J. Physiother.* 2015; 61 (4): 182–189. <https://doi.org/10.1016/j.jphys.2015.08.009>
66. González-Álvarez F., Valenza M., Cabrera-Martos I., Torres Sánchez I. et al. Effects of a diaphragm stretching technique on pulmonary function in healthy participants: A randomized-controlled trial. *Int. J. Osteopath. Med.* 2014; 18 (1): 5–12. <https://doi.org/10.1016/j.ijosm.2014.08.001>
67. Noll D.R., Degenhardt B.F., Johnson J.C. Multicenter osteopathic pneumonia study in the elderly: Subgroup analysis on hospital length of stay, ventilator-dependent respiratory failure rate, and in-hospital mortality rate. *J. Amer. Osteopath. Ass.* 2016; 116 (9): 574–587.
68. Nair A., Alaparthy G.K., Krishnan S., Rai S. et al. Comparison of diaphragmatic stretch technique and manual diaphragm release technique on diaphragmatic excursion in chronic obstructive pulmonary disease: A randomized crossover trial. *Pulm. Med.* 2019; 2019: 6364376. <https://doi.org/10.1155/2019/6364376>
69. Ritambhara Y., Tarun K., Dr. Jeyanthi. S. Effect of manual diaphragm release technique on transversus abdominis activation, pulmonary function and chest expansion — a randomized control trial. *Int. J. All Res. Educat. Sci. Methods.* 2024; 12 (7): 2108–2112. <https://doi.org/10.56025/IJARESM.2024.1207242108>
70. Hosking S.W. The effect of osteopathic manipulative techniques on diaphragm movement and respiratory function in asymptomatic subjects; 2009. <https://www.researchbank.ac.nz/server/api/core/bitstreams/43fc15bf-531e-4db0-978c-ab1a091e75d5/content>

71. Allen T. W., D'Alonzo G. E. Investigating the role of osteopathic manipulation in the treatment of asthma. J. Amer. Osteopath. Ass. 1993; 93 (6): 654–656.
72. Yao S., Hassani J., Gagne M., George G. et al. Osteopathic manipulative treatment as a useful adjunctive tool for pneumonia. J. Vis. Exp. 2014; (87): e50687. <https://doi.org/10.3791/50687>

Сведения об авторах:

Юлия Павловна Потехина, докт. мед. наук, профессор, Приволжский исследовательский медицинский университет, профессор кафедры нормальной физиологии им. Н. Ю. Беленкова (Нижний Новгород); Институт остеопатии (Санкт-Петербург), заместитель директора по научно-методической работе
eLibrary SPIN: 8160-4052
ORCID ID: 0000-0001-8674-5633
Scopus Author ID: 55318321700

Константин Михайлович Толмачев, врач-трансфузиолог, Городская клиническая больница им. С. С. Юдина
eLibrary SPIN: 8513-3661
ORCID ID: 0009-0000-9040-2465

Information about authors:

Yulia P. Potekhina, Dr. Sci. (Med.), Professor, Privolzhsky Research Medical University, Professor at the N. Yu. Belenkov Department of Normal Physiology (Nizhny Novgorod); Institute of Osteopathy (Saint-Petersburg), Deputy Director for Scientific and Methodological Work
eLibrary SPIN: 8160-4052
ORCID ID: 0000-0001-8674-5633
Scopus Author ID: 55318321700

Konstantin M. Tolmachev, transfusiologist, City Clinical Hospital named after S. S. Yudin
eLibrary SPIN: 8513-3661
ORCID ID: 0009-0000-9040-2465