

ОБЗОР

© КОЛЛЕКТИВ АВТОРОВ, 2019

КОМПЛЕКСНОЕ НЕЙРОФИЗИОЛОГИЧЕСКОЕ И УЛЬТРАЗВУКОВОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДИАФРАГМАЛЬНОГО НЕРВА В НОРМЕ И ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ПАТОЛОГИЧЕСКИХ СОСТОЯНИЯХ**Войтенков В.Б.^{1,2}, Команцев В.Н.³, Екушева Е.В.², Клишкин А.В.¹, Скрипченко Н.В.¹**¹ФГБУ Детский научно-клинический центр инфекционных болезней Федерального медико-биологического агентства, Санкт-Петербург, 197022, Россия²Академия постдипломного образования Федерального государственного бюджетного учреждения «Федеральный научно-клинический центр специализированных видов медицинской помощи и медицинских технологий Федерального медико-биологического агентства», Москва, 125371, Россия³Федеральное государственное бюджетное учреждение «Санкт-Петербургский научно-исследовательский психоневрологический институт имени В.М. Бехтерева», 192019, Санкт-Петербург, Россия

В обзоре приводятся сведения о нейрофизиологическом и нейровизуализационном методах исследования диафрагмального нерва. Основной нейрофизиологической методикой является электронейрография (ЭНГ). В визуализации диафрагмального нерва основную роль играет ультразвуковое исследование (УЗИ). Электронейрографическое исследование диафрагмального нерва при условии его правильного методического выполнения является несложной методикой как в исполнении, так и при дальнейшей интерпретации полученных данных. При ЭНГ-исследовании диафрагмального нерва у детей необходимо учитывать возрастные аспекты и значительную вариабельность показателей латентности и амплитуды М-ответа даже у здоровых детей разного возраста. Показатели амплитуды М-ответа и его латентности изменяются при различных патологических процессах в соответствии с их патогенезом. УЗИ диафрагмального нерва позволяет визуализировать анатомическую непрерывность нервного ствола нерва на уровне шеи и объективно оценить толщину нерва, что предоставляет дополнительную информацию врачу в клинической практике.

Ключевые слова: диафрагмальный нерв, электронейрография, ультразвуковое исследование, детский возраст.

Для цитирования: Войтенков В.Б., Команцев В.Н., Екушева Е.В., Клишкин А.В., Скрипченко Н.В. Комплексное нейрофизиологическое и ультразвуковое исследование диафрагмального нерва в норме и при различных патологических состояниях. *Российский неврологический журнал*. 2019;24(3):5–9 (Russian). DOI 10.30629/2658-7947-2019-24-3-5-9.

Для корреспонденции: Войтенков Владислав Борисович – к.м.н., зав. отделением функциональных методов диагностики ФГБУ Детского научно-клинического центра инфекционных болезней ФМБА России, 197022, Санкт-Петербург; ул. профессора Попова, д.9.; e-mail: vlad203@inbox.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0448-7402>
NEUROPHYSIOLOGY AND ULTRASOUND IN THE EVALUATION OF PHRENIC NERVE IN NORMAL AND PATHOLOGIC CONDITIONS

*Voitenkov V.B.^{1,2}, Komantsev V.N.³, Ekusheva E.V.², Klimkin A.V.¹, Skripchenko N.V.¹*¹Pediatric Research and Clinical Center for Infectious Diseases, St-Petersburg, 197022, Russia²Academy of Postgraduate Education under FSBU FSCC of FMBA of Russia, Moscow, 125371, Russia³St.Petersburg Psychoneurological Research Institute, Saint-Petersburg, 192019, Russia

Abstract. *We provide data on neurophysiology and ultrasound of phrenic nerve. In the visualization of the phrenic nerve the main role is played by ultrasound. Conduction study of the phrenic nerve, if performed properly, is a simple and reliable method. In pediatric population, though, age dynamic and wide range of normative parameters has to be taken into the consideration. Ultrasound of the phrenic nerve allows visualization of the anatomical continuity of the nerve trunk of the nerve at the level of the neck and objectively assess the thickness of the nerve, which provides additional information to the doctor in clinical practice.*

Key words: phrenic nerve, electroneurography, ultrasound, children.

For citation: Voitenkov V.B., Komantsev V.N., Ekusheva E.V., Klimkin A.V., Skripchenko N.V. Neurophysiology and ultrasound in the evaluation of phrenic nerve in normal and pathologic conditions. *Russian Neurological Journal (Rossijskij Nevrologicheskij Zhurnal)* 2019;24(3):5–9 (Russian). DOI 10.30629/2658-7947-2019-24-3-5-9.

For correspondence: Voitenkov Vladislav Borisovich – MD, PhD, Head of the clinical department of functional diagnostics. Pediatric Research and Clinical Center for Infectious Diseases, Russia, 197022, St-Petersburg, prof. Popova st., 9; e-mail: vlad203@inbox.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0448-7402>

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Acknowledgements. The study had no sponsorship.

Диафрагмальный нерв (*n. phrenicus*) представляет собой парный смешанный нерв, берущий начало из передних ветвей СIII-CV спинномозговых корешков шейного сплетения, является наиболее крупным его нервом. Две трети волокон диафрагмального нерва – двигательные, иннервируют диафрагму и принимают участие в реализации акта дыхания. Оставшаяся треть волокон – сенсорные, иннервируют плевру, перикард (перикардальная ветвь – *n. pericardiacus*) и диафрагмальную брюшину (диафрагмально-брюшинные ветви – *nn. phrenicoabdominales*) [1, 2].

Невропатия диафрагмального нерва может быть односторонней и двусторонней. Одностороннее поражение диафрагмального нерва может протекать асимптомно и являться случайной находкой при рентгенографии легких. Однако возможны клинические проявления неспецифического характера, например, у взрослых при одностороннем поражении диафрагмального нерва может наблюдаться симптомокомплекс «сухого плеврита» или «затянувшейся стенокардии», не купируемой нитроглицерином. Возникающая при этом боль может иррадиировать в область шеи и плеча на стороне поражения, усиливаясь при глотании, глубоком дыхании и кашле [3], иногда может отмечаться ослабление нижнего диафрагмального дыхания (когда во время вдоха не происходит движения передней брюшной стенки), реже – пароксизмы длительной икоты. Двустороннее поражение диафрагмального нерва приводит к существенному снижению переносимости физической нагрузки, диспноэ, ортопноэ или одышке в положении лежа, гиперкапнической дыхательной недостаточности, выраженной утомляемости и повышению артериального давления; а в ряде случаев – к еще более серьезным жизнеугрожающим последствиям [3–5]. В частности, новорожденным с двусторонним поражением диафрагмального нерва требуется искусственная вентиляция легких.

При двусторонней идиопатической невропатии диафрагмального нерва описывается синдром «плавательного бассейна», при котором начинает ощущаться стесненное дыхание при погружении в воду, как только она доходит до уровня живота; когда вода достигает уровня дерматомов Th6-Th7, пациент не может дышать. Это объясняется направленным вверх давлением на брюшную полость, оказываемым водой [6].

В клинической практике при поражении диафрагмального нерва, передних рогов и передних корешков III-IV шейных сегментов спинного мозга наблюдается парадоксальный тип дыхательных движений брюшной стенки, при которых объем грудной клетки уменьшается во время вдоха и увеличивается во время выдоха, то есть происходят дыхательные движения «с точностью наоборот». Рентгенологически признаками данного процесса являются высокое стояние и неподвижность диафрагмы.

Причинами развития поражения диафрагмального нерва могут быть острая брахиоплексопатия (идиопатическая или наследственная), родовая травма, идиопатическая форма невропатии, саркоидоз,

центральный парез диафрагмы при инсульте. Дифференциальную диагностику проводят с опоясывающим лишаем с вовлечением двигательных волокон, болезнью двигательного нейрона, миастенией, миотонической дистрофией, полиомиелитом, полиомиозитом и дерматомиозитом [6].

Регистрация моторного ответа при обследовании диафрагмального нерва методом электронейрографии (ЭНГ), с последующим анализом его параметров, (латентности и амплитуды) позволяет объективно оценить функциональное состояние как исследуемого нерва, так и диафрагмы, поскольку установить причину и выраженность поражения диафрагмального нерва не всегда просто (табл. 1), особенно в детском возрасте [7, 8].

Таблица 1

Основные причины поражения диафрагмального нерва

Причина поражения диафрагмального нерва	Примеры поражения диафрагмального нерва
Травматическое поражение нерва	Перевязка или повреждение во время хирургической операции на грудной или брюшной полости; родовая травма; травма шеи; тракционное воздействие с повреждением верхнего ствола плечевого сплетения
Компрессионное поражение нерва	Опухоль грудной полости
Нервно-мышечное заболевание	Миастения, болезнь Помпе, невралгическая амиотрофия Персонейджа-Тернера
Компрессионно-ишемическая невропатия	Диабетическая полиневропатия, невринома диафрагмального нерва
Иные	Боковой амиотрофический склероз, острая воспалительная демиелинизирующая полиневропатия, болезнь Такаясу, саркоидоз; хроническая воспалительная демиелинизирующая полиневропатия; мультифокальная моторная невропатия с блоками проведения

Table 1

Main causes of phrenic nerve clinical involvement

Cause of the phrenic nerve clinical involvement	Examples of the phrenic nerve clinical involvement
Traumatic lesion	Lesion during the thoracic or abdominal surgery; birth injury; neck injury; brachial plexus upper root lesion due to traction
Compression of the nerve	Thoracic tumor
Neuromuscular disease	Myasthenia; Pompe disease; neuralgic amyotrophy (Parsonage-Turner syndrome)
Ischemic neuropathy	Diabetic polyneuropathy; phrenic nerve schwannoma
Other	Amyotrophic lateral sclerosis; acute inflammatory demyelinating polyneuropathy; Takayasu disease; sarcoidosis; chronic inflammatory demyelinating polyneuropathy; multifocal motor neuropathy with conduction blocks

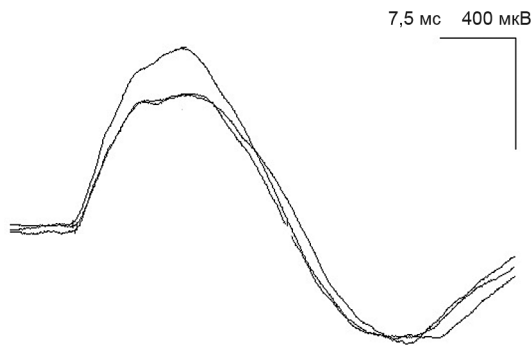


Рис. 1. Пример нормального М-ответа при ЭНГ диафрагмального нерва у здорового ребенка в возрасте 12 лет
Fig. 1. Example of the normal CMAP of diaphragm in healthy 12-years-old child

По данным ряда работ, были определены нормативные показатели проведения по диафрагмальному нерву у взрослых и детей [9–13]. Средняя латентность М-ответа с диафрагмы при исследовании взрослых составляет $7,7 \pm 0,80$ мс [11]. Показатель латентности М-ответа при ЭНГ диафрагмального нерва у детей прямо пропорционален по мере взросления длине проводника, определяемой в том числе антропометрическими размерами шеи и торса [12, 13].

При проведении электрофизиологического исследования диафрагмального нерва активный электрод накладывается на мечевидный отросток грудины, референтный – на VII межреберный промежуток по срединно-ключичной линии [14]. Предложена его модификация путем применения трехканальной схемы регистрации с одновременным наложением регистрирующих электродов также на дельтовидную мышцу и переднюю зубчатую мышцу [13]. Данный вариант исследования применяется для того, чтобы избежать параллельной стимуляции волокон плечевого сплетения и наложения мышечной активности дельтовидной и зубчатой мышц. Согласно данным Y. Luo и соавт., при стимуляции волокон плечевого сплетения значение амплитуды вызванного М-ответа не меняется, тогда как показатель латентности уменьшается в среднем на 3 мс [15]. Стимуляция проводится на уровне наружного края грудино-ключично-сосцевидной мышцы, нижней её трети, с максимальной силой тока 40 мА. Длительность стимула – 0,2 мс. Электрическая стимуляция осуществляется во время вдоха до получения максимальных показателей М-ответа. Средние значения латентности М-ответа у детей в возрасте от 1 года до 17 лет составляют $5,64 \pm 1,25$ мс и амплитуды – $0,66 \pm 0,34$ мВ. При анализе электрофизиологических показателей в зависимости от возраста были получены данные по возрастным подгруппам 1-2 года ($n=7$), 3-5 лет ($n=9$), 6-12 лет ($n=15$) и 13-18 лет ($n=17$), установлено, что латентности составляют $4,96 \pm 1,94$; $5,01 \pm 1,13$; $5,42 \pm 0,84$ и $6,44 \pm 1,43$ мс соответственно и амплитуды $1,01 \pm 0,37$; $0,87 \pm 0,31$; $0,61 \pm 0,24$ и $0,45 \pm 0,21$ мВ соответственно. Показатели подгруппы детей в возрасте 1-2 лет достоверно

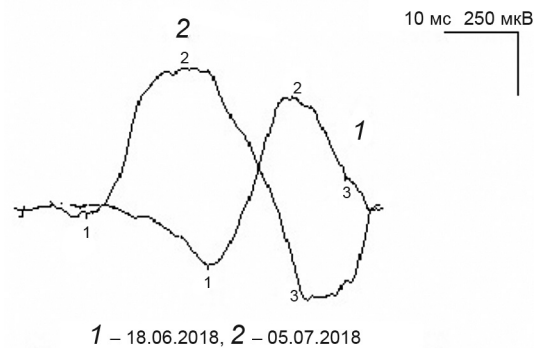


Рис.2. Динамика изменения М-ответа с диафрагмы у пациентки 3 лет, через 10 дней (1) и 1 мес (2) от начала развития острой воспалительной демиелинизирующей полиневропатии (в остром периоде заболевания и периоде ранней реконвалесценции)
Fig. 2. Changes of the CMAP from the diaphragm in 3-years old patient at 10 days (1) & 1 month after the onset of the acute inflammatory demyelinating polyneuropathy (in acute period of the disease & in early recovery period)

отличаются по показателю амплитуды М-ответа от детей в возрасте 6-12 и 13-18 лет [13]. На рис. 1 представлен пример неизмененного М-ответа при ЭНГ диафрагмального нерва у ребенка в возрасте 12 лет.

При заболеваниях центральной и периферической нервной системы при ЭНГ диафрагмального нерва могут выявляться показатели, отклоняющиеся от нормы. В частности, при острой воспалительной демиелинизирующей полиневропатии у детей в остром периоде заболевания (3-7-е сутки) регистрируется удлинение латентности М-ответа при сохранении нормальных показателей амплитуды (рис. 2).

При хроническом, далеко зашедшем процессе демиелинизации, например, при наследственной полиневропатии Шарко-Мари-Тута I типа, регистрируется удлинение латентности М-ответа до 14-17 мс, при этом могут наблюдаться нормальные или умеренно сниженные показатели его амплитуды (рис. 3).

В клинической практике в последние годы широкое применение получило ультразвуковое исследование (УЗИ) диафрагмального нерва [16, 17]. Данный вид инструментального исследования применяется с целью визуализации и оценки целостности и толщины нервного ствола возможно на уровне шеи. УЗИ проксимальной части диафрагмального

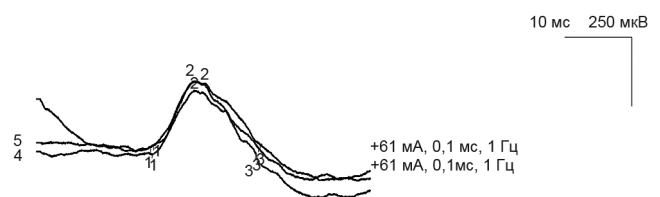


Рис. 3. М-ответ с диафрагмы у пациента в возрасте 10 лет с наследственной полиневропатией Шарко-Мари-Тута I типа
Fig. 3. Changes of the CMAP from the diaphragm in 10-years old patient with I type of Charcot-Marie-Tooth disease

нерва проводится между *m. sternocleidomastoideus* и *m. scalenus anterior* на уровне верхнего пучка плечевого сплетения (ППС) (рис. 4, А, см. 2-ю полосу обложки). Диаметр ППС, по нашим данным, в среднем составляет $1,1 \pm 0,1$ мм², достоверной разницы между сторонами нет.

УЗИ дистальной части диафрагмального нерва проводится между *m. sternocleidomastoideus* и *m. scalenus anterior* на уровне ключевой кости (см. рис. 4, Б, см. 2-ю полосу обложки). Диаметр ППС в среднем составляет $0,7 \pm 0,1$ мм², достоверной разницы между сторонами нет.

УЗИ реберной части *m. diaphragma* проводят на уровне VI-VII ребер, датчик располагают во фронтальной плоскости. Толщина мышцы в среднем составляет 5 ± 2 мм.

Таким образом, при ЭНГ диафрагмального нерва у здоровых детей наблюдается существенная вариабельность показателей латентности и амплитуды М-ответа. При этом отмечается тенденция к увеличению показателей латентности с возрастом и достоверное снижение амплитудных показателей. Последняя находка, возможно, может объясняться увеличением толщины мышечно-кожного слоя с возрастом, что затрудняет регистрацию М-ответа с такой относительно глубоко залегающей мышцей, как диафрагма.

Вызванный при стимуляции нерва М-ответ представляет собой сумму электрических ответов двигательных единиц иннервируемой им мышцы. Показатель латентности М-ответа косвенно отражает длину проводника и скорость распространения по нему сигнала, в то время как показатель амплитуды М-ответа свидетельствует о числе активированных двигательных единиц. Таким образом, увеличение значения латентности М-ответа с возрастом является закономерным явлением и объясняется увеличением длины исследуемого проводника. Подобного рода возрастная динамика наблюдается при исследовании других нейрофизиологических параметров [18].

При различных заболеваниях исследование показателей латентности и амплитуды М-ответа при ЭНГ диафрагмального нерва и данных УЗИ является перспективным в качестве дополнительного источника информации при невропатии и поражении цервикальных сегментов спинного мозга, а также при прогнозировании развития дыхательной недостаточности у пациентов с острой и с хронической патологией нервной системы (синдром Гийена-Барре с нарушением дыхательной функции, перинатальная травма шейного сплетения, боковой амиотрофический склероз и др.) и осуществления нейрофизиологического мониторинга эффективности лечебного процесса [19–23]. Для использования данных параметров в клинической педиатрической практике необходимо наличие собственной базы нормативных нейрофизиологических показателей. Недостаточно изучены параметры ультразвуковых изменений при патологических нарушениях, что тоже требует дальнейших исследований.

Заключение

Электронейрографическое исследование диафрагмального нерва при условии его правильного методического выполнения является несложной методикой как в исполнении, так и при дальнейшей интерпретации полученных данных.

При ЭНГ-исследовании диафрагмального нерва у детей необходимо учитывать возрастные аспекты и значительную вариабельность показателей латентности и амплитуды М-ответа даже у здоровых детей разного возраста.

Показатели амплитуды М-ответа и его латентности изменяются при различных патологических процессах в соответствии с их патогенезом.

УЗИ диафрагмального нерва позволяет визуализировать анатомическую непрерывность нервного ствола нерва на уровне шеи и объективно оценить толщину нерва, что предоставляет дополнительную информацию врачу в клинической практике.

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Kot Baixauli P, Rodriguez Gimillo P, Baldo Gosálvez J, de Andrés Ibáñez J. Usefulness of diaphragmatic ultrasound in the early diagnosis of phrenic nerve palsy after shoulder surgery in the prevention of post-operative respiratory complications. *Rev Esp Anestesiol Reanim.* 2018;65(10):593-596. <https://doi.org/10.1016/j.redar.2018.05.008>.
2. Perotto A.O., Delagi E.F., Iazzetti J., Daniel M. Anatomical guide for the electromyographer: the limbs and trunk. Thomas C.C. Publisher, LTD. 5th ed., 2011. 378 p.
3. Podnar S. Idiopathic phrenic neuropathies: a case series and review of the literature. *Muscle Nerve.* 2015;52(6):986-92. <https://doi.org/10.1002/mus.24673>.
4. Gaber T.A.-Z.K. Case studies in neurological rehabilitation. Cambridge University Press. 2008. 193 p.
5. Jenkins J.A., Sakamuri S., Katz J.S., Forshew D.A., Guion L., Moore D., Miller R.G. Phrenic nerve conduction studies as a biomarker of respiratory insufficiency in amyotrophic lateral sclerosis. *Amyotroph Lateral Scler Frontotemporal. Degener.* 2016;17(3-4):213-20. <https://doi.org/10.3109/21678421.2015.1112406>.
6. Feldman E.L., Grisold W., Russell J.W., Löscher W.N. Atlas of Neuromuscular Diseases: A Practical Guideline. Springer-Verlag. Wien, 2014. 320 P.
7. Ricoy J, Rodríguez-Núñez N, Álvarez-Dobaño JM, Toubes ME, Riveiro V, Valdés L. Diaphragmatic dysfunction. *Pulmonology.* 2018. pii: S2531-0437(18)30162-4. <https://doi.org/10.1016/j.pulmoe.2018.10.008>.
8. Smith B.K., Corti M., Martin A.D., Fuller D.D., Byrne B.J. Altered activation of the diaphragm in late-onset Pompe disease. *Respir. Physiol. Neurobiol.* 2016;222: 11-5. <https://doi.org/10.1016/j.resp.2015.11.013>.
9. Heinbecker P., Bishop G.H., O'Leary J.L. Functional and histologic studies of somatic and autonomic nerves of man. *Arch Neuropsych.* 1936; 35(6):1233-1255.
10. Sarnoff SJ, Hardenbergh E, Whittenberger JL. Electrophrenic respiration. *Am J Physiol.* 1948;155(1):1-9. PMID:17733839
11. Davis J.N. Phrenic nerve conduction in man. *J Neurol Neurosurg Psychiatry.* 1967;30(5):420-6. PMID:4294147
12. Moosa A. Phrenic nerve conduction in children. *Dev Med Child Neurol.* 1981;23(4):434-48. PMID:7274591

13. Войтенков В.Б., Команцев В.Н., Скрипченко Н.В., Екушева Е.В., Клишкин А.В., Аксёнова А.И. Электронейрографическое исследование диафрагмального нерва у здоровых детей. Нервно-мышечные болезни. 2018;8(2):53-58. [Voitenkov V.B., Komantsev V.N., Skripchenko N.V., Ekusheva E.V., Klimkin A.V., Axenova A.I. Conduction studies of the phrenic nerve in healthy children. *Neuromuscular Diseases*. 2018;8(2):53-58. (In Russian)]. <https://doi.org/10.17650/2222-8721-2018-8-2-53-58>
14. Carvalho M, Alves M, Sales-Luís ML. Neurophysiologic study of the phrenic nerve. *Acta Med Port*. 1991;4(6):297-300. PMID:1807093
15. Luo Y M ,Polkey M I, Lyall R A , Moxham J. Effect of brachial plexus co-activation on phrenic nerve conduction time. *Thorax*. 1999; 54:765–770. PMID:10456968 DOI:10.1136/thx.54.9.765
16. Boon AJ, O’Gorman C. Ultrasound in the Assessment of Respiration. *J Clin Neurophysiol*. 2016;33(2):112-9. <https://doi.org/10.1097/WNP.0000000000000240>.
17. Martinez de Posadas M.C. Liste H., Cottini C. Aranafe N. Combined phrenic nerve conduction and diaphragmatic ultrasound, in children's neuro muscular diseases. *Journal of the neurological sciences*. 1997.150(1):S95. [https://doi.org/10.1016/S0022-510X\(97\)85305-1](https://doi.org/10.1016/S0022-510X(97)85305-1).
18. Voitenkov V.B., Klimkin A.V., Skripchenko N.V., Aksenova A.I., Gerasimov A.P. Age-related dynamics of the parameters of somatosensory evoked potentials in healthy children. *Human Physiology*. 2017;43(4):391-394. <https://doi.org/10.1134/S0362119717040156>
19. MacLean I. C., Mattioni T. A. Phrenic nerve conduction studies: a new technique and its application in quadriplegic patients. *Arch. Phys. Med. Rehabil*. 1981;25:229–236. PMID:6972202
20. Zifko U, Chen R, Remtulla H, Hahn AF, Koopman W, Bolton CF. Respiratory electrophysiological studies in Guillain-Barré syndrome. *J Neurol Neurosurg Psychiatry*. 1996;60(2):191-4. PMID:8708652 DOI: 10.1136/jnnp.60.2.191
21. Preston DC, Shapiro BE. *Electromyography and Neuromuscular Disorders*, 3rd Edition. 2013. Saunders, Philadelphia. 664 p.
22. Da Costa R, Doctor P, Mahajan K, Lakkappan VG. Bilateral Phrenic Nerve Palsy in a Diabetic Causing Respiratory Failure. *Indian J Crit Care Med*. 2018;22(10):737-739. https://doi.org/10.4103/ijccm.IJCCM_261_18.
23. Bousuges A, Brégeon F, Blanc P, Gil JM, Poirrette L. Characteristics of the paralysed diaphragm studied by M-mode ultrasonography. *Clin Physiol Funct Imaging*. 2019;39(2):143-149. <https://doi.org/10.1111/cpf.12549>.

Поступила 21.02.19
 Принята к печати 12.03.19