

Научная статья / Original article

УДК 517.958.531.3-324

<https://doi.org/>

ЗНАЧЕНИЕ CO₂ ПРИ ПАТОЛОГИЯХ СПИННОГО МОЗГА И СПИННОМОЗГОВЫХ НЕРВОВ

Алексей Георгиевич Зверев¹, Святослав Валерьевич Новосельцев^{1,2}, Олег Сергеевич Якименко³

¹ Северо-Западная академия остеопатии и медицинской психологии, Санкт-Петербург, Россия

² Первый МГМУ им. И.М. Сеченова Минздрава России (Сеченовский университет), Москва, Россия

³ Медицинский центр "Med&Care", Москва, Россия

РЕЗЮМЕ

В статье показаны на анатомической модели спинного мозга и спинномозгового нерва изменения тока спинномозговой жидкости, которые происходят при различных патологиях, зафиксированных снимками МРТ [4,5]. Эти изменения влияют на динамические параметры оттока спинномозговой жидкости [2] и растворенного в ней CO₂, приводя к снижению газообмена и заставляя организм снижать свои функциональные резервы.

Ключевые слова: спинномозговая жидкость, CO₂, микроспинальная полость, мануальная терапия, остеопатия

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:

Зверев А.Г. – <https://orcid.org/0000-0001-5501-2023>, alexei.osteopat@ya.ru

Новосельцев С.В. – <https://orcid.org/0000-0002-0596-2343>, snovoselcev@mail.ru

Якименко О.С. – <https://orcid.org/0000-0002-1742-6775>, yaosteopat@mail.ru

Автор, ответственный за переписку: Святослав Валерьевич Новосельцев, snovoselcev@mail.ru

КАК ЦИТИРОВАТЬ:

Зверев А.Г., Новосельцев С.В., Якименко О.С. Значение CO₂ при патологиях спинного мозга и спинномозговых нервов // Мануальная терапия. 2024. №93(2). С. 32-39. <https://doi.org/>

SIGNIFICANCE OF CO₂ IN PATHOLOGIES OF THE SPINAL CORD AND SPINAL NERVES

Alexey G. Zverev¹, Svyatoslav V. Novoseltsev^{1,2}, Oleg S. Yakimenko³

¹ North-West Academy of Osteopathy and Medical Psychology, Saint-Petersburg, Russia

² I.M. Sechenov First Moscow State Medical University of the Ministry of Health of Russia (Sechenov University), Moscow, Russia

³ "Med&Care" Medical Center, Moscow, Russia

ABSTRACT

The article shows the changes in cerebrospinal fluid flow that occur in various pathologies, recorded by MRI images [4,5], using the anatomical model of the spinal cord and spinal nerve. These changes affect the dynamic parameters of cerebrospinal fluid outflow [2] and CO₂ dissolved in it, lead to a decrease in gas exchange and cause the body to reduce its functional reserves.

Ключевые слова: cerebrospinal fluid, CO₂, microspinal cavity, manual therapy, osteopathy

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:

Zverev A.G. – <https://orcid.org/0000-0001-5501-2023>, alexei.osteopat@ya.ru

Novoseltsev S.V. – <https://orcid.org/0000-0002-0596-2343>, snovoselcev@mail.ru

Yakimenko O.S. – <https://orcid.org/0000-0002-1742-6775>, yaosteopat@mail.ru

Corresponding author: Svyatoslav V. Novoseltsev, snovoselcev@mail.ru

TO CITE THIS ARTICLE:

Zverev A.G., Novoseltsev S.V., Yakimenko O.S. Significance of CO₂ in pathologies of the spinal cord and spinal nerves // *Manualnaya Terapiya = Manual Therapy*. 2024;93(2):32-39. (In Russ.). <https://doi.org/>

ВВЕДЕНИЕ

В статье приведены 2 класса патологий в спинальной полости: биомеханические (структуральные), связанные с патологиями опорно-двигательного аппарата (ОДА) и краниосакрального механизма (КСМ), и гидродинамические (жидкостные), когда происходит формирование опухолей и смещение – птозы мягких тканей. В обоих случаях происходит изменение динамических параметров спинномозговой жидкости (СМЖ): давления, скорости, расхода. Однако построение моделей для жидкостных патологий сложнее, т.к. приходится учитывать пульсацию СМЖ и деформированную 3D-геометрию измененных объёмов спинальной и микроспинальной полостей. Если не рассматривать вирусно-инфекционный подход, то развитие большинства патологий связано с дисфункцией позвоночно-двигательного сегмента (ПДС) [1]. Она приводит к нарушению биомеханики КСМ, деформации структур позвоночника, спинномозгового нерва и изменению гидродинамики в спинальной и микроспинальной полостях. На примере газообмена CO_2 будет показано, как дефекты влияют на СМЖ [2]. Этот подход расширит знания о газообмене CO_2 и улучшит понимание функционирования спинномозговых нервов, конечной структуры ЦНС, так как будет более научно описывать этот сложный процесс недостаточно изученного одного из её механизмов. Кроме этого можно будет более подробно анализировать влияние патологий на организм и точнее ставить диагноз. Ранние описания [3,4,8,16], недостаток расчетов и постановка диагноза только по снимкам МРТ, КТ и УЗИ дают ответ только поверхностно, констатируя лишь визуализацию.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Рассмотрим на рис. 1 сложную схему спинальной и микроспинальной полостей с одним спинномозговым нервом [2]. Для остальных спинномозговых нервов эта схема описания аналогичная.

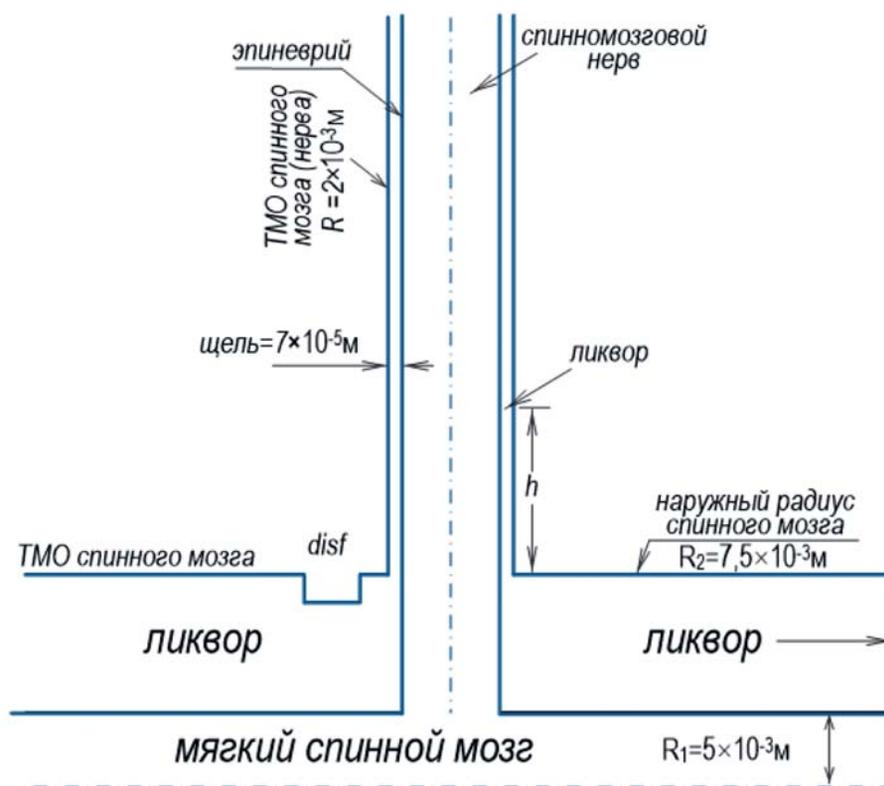


Рис. 1. Схема спинальной и микроспинальной полостей [2]

Гидродинамику реальной анатомии можно описывать нестационарным пульсирующим движением СМЖ в кольцевой трубе, в которой её отток происходит в венозную систему оболочек мягкого спинного мозга и спинномозгового нерва [8,13], т.е. в их венозные капилляры. Пульсация СМЖ происходит за счет синхронизации пульсации сердца, пульсации мозговых сосудов и биомеханики КСМ, которые в черепе из части пульсирующей артериальной крови вырабатывают СМЖ фильтрацией [6,10-13]. Одновременно в СМЖ при газообмене поступает CO_2 [14]. Далее СМЖ под действием КСМ в единой краниоспинальной полости за счет диффузии всасывается в венозные капилляры спинномозгового нерва (мягкая мозговая оболочка (ММО) спинного мозга повторяет технологию оттока в венозные синусы черепа) [3]. Общая глубина микроспинальной полости небольшая, в том числе с учетом капиллярного эффекта, где раскрываются паутинные ворсинки, позволяющие облегчать диффузию CO_2 . Такая компактность связана с минимизацией расхода энергии и рациональным строением организма. Диффузия СМЖ в венозные капилляры спинномозгового нерва однонаправлена [5], она возникает при $\Delta P = 3 \div 5$ мм рт. ст., времени диффузии $0.3 \div 0.75$ с, т.е. быстро прекращается с изменением ΔP . За счёт пульсации СМЖ это происходит в фазу пика систолы, когда $P_{СМЖ}$ в микроспинальной полости максимально. Также на рис. 2 видно, что паутинные ворсинки находятся рядом с микрощелью, где образуется дисфункция ПДС.

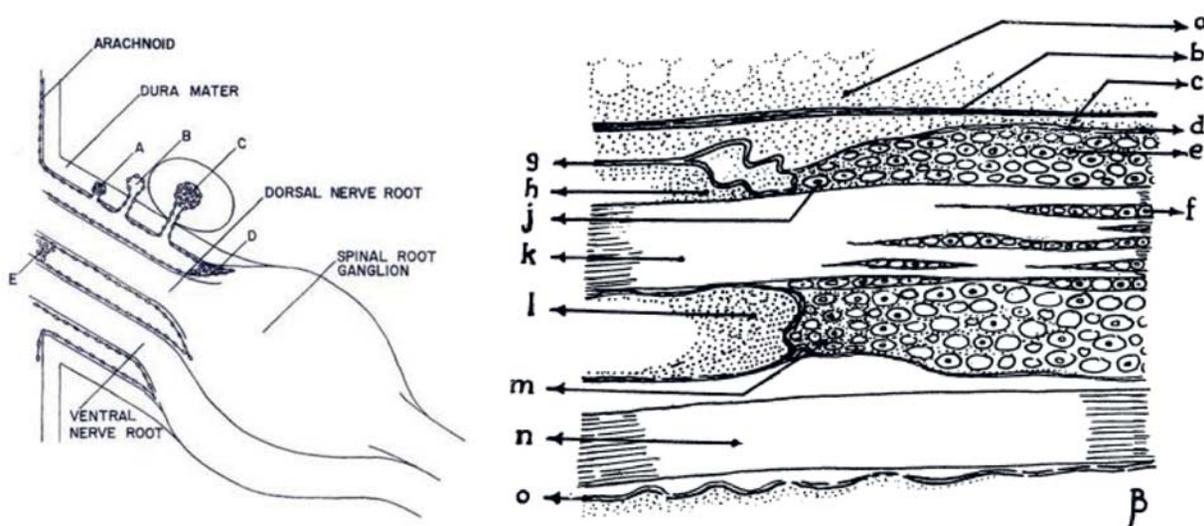


Рис. 2. Структура микроспинальной полости и образование паутинных ворсинок, А, В, С, g – паутинные ворсинки разной длины

Там же происходит поражение самих ворсинок [17], что является нарушением утилизации CO_2 и оттока СМЖ в венозную систему самого спинномозгового нерва, а причина та же – дисфункция ПДС. Обратим внимание, что СМЖ в позвоночнике является амортизатором для спинного мозга. Также она является амортизатором для спинномозгового нерва, а сама конструкция кольцевой трубы дает возможность уравнивать возникающее избыточное давление при патологиях на мягком спинном мозге и спинномозговом нерве по поперечному сечению.

Рассмотрим возможные патологии (рис. 3, 4) [5,16], которые соответствуют снимкам МРТ.

При дисфункции ПДС, стенозе, дисфункции Вебстера [1,2,8], оссификации связок, остеофитах, спондилолистезе, различных видах опухолей (гидроцефалии), опущений (аномалия Арнольда-Киари) и сирингомиелии ведущей патологией (причиной) является дисфункция ПДС

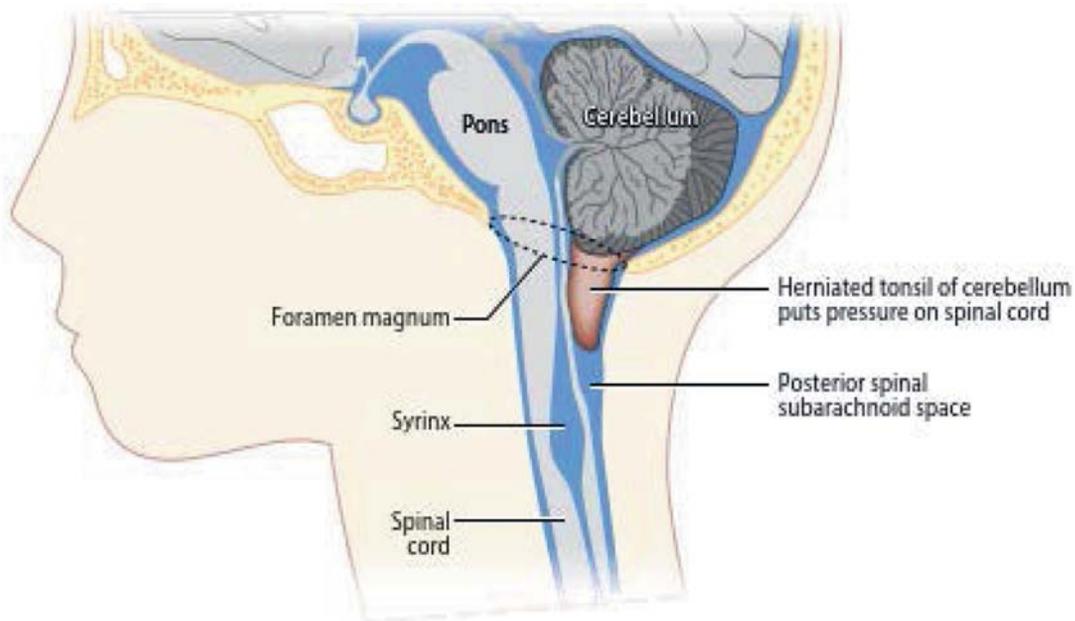


Рис. 3. Аномалия Арнольда-Киари

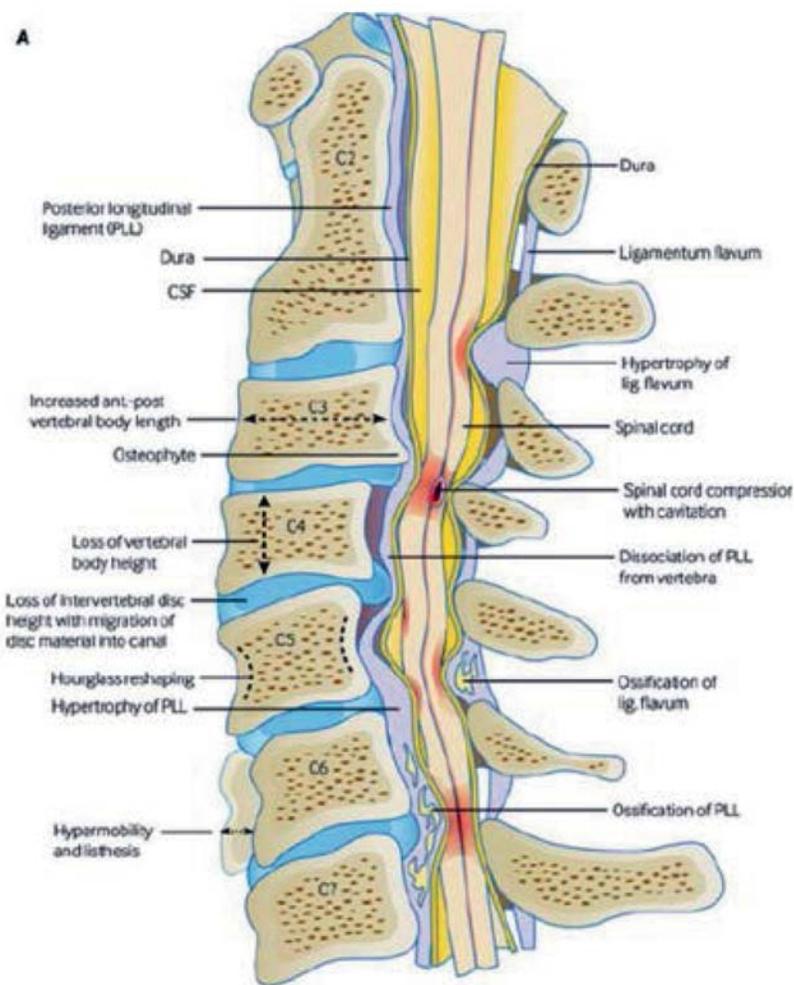


Рис. 4. Патологии спинного мозга

[1], а её следствием – локальный стеноз твердой мозговой оболочки (ТМО). Остальные патологии возникают впоследствии, поэтому вторичны. Генетические дефекты на клеточном уровне и грубые травмы различной этиологии в статье не рассматриваются. Таким образом, экспериментально видно, что вышеуказанные патологии:

Уменьшают общий объем спинальной и микроспинальной полостей, снижая концентрацию CO₂ в СМЖ.

Изменяют средние скорости движения СМЖ, нарушают приток свежей СМЖ ниже самой патологии за счет нарушения пульсаций, то есть за счет повышения сопротивления при оттоке в фазе диастолы.

В зоне недостатка СМЖ она меньше омывает спинномозговой нерв [2], нарушая морфологию паутинных ворсинок [17], снижая его работоспособность и функциональные возможности иннервируемых тканей, уменьшая газообмен CO₂ и отток в венозные капилляры самого нерва, снижая метаболизм.

Снижение объёма СМЖ замедляет рассасывание отёка при травмах, т.к. снижает иммунитет, который техникой CV₄ остеопат способен усилить вместо приёма лекарств.

5. В более тяжелых случаях патологии приводят к локальной блокаде тока СМЖ в соответствующем сегменте ПДС, вместе со спинномозговым нервом.

Далее можно предположить [5], что отток СМЖ в спинальной полости и микроспинальной полости можно описывать аналогом уравнения Девсона, на основе уравнения Дарси:

$$CFS_{\frac{\text{Оттока}}{\text{в СМ}}} = \frac{\Delta P}{R_{\text{Оттока}}}$$

$$CFS_{\frac{\text{Оттока}}{\text{в СМ нерве}}} = \frac{\Delta P}{R_{\text{Оттока}}}$$

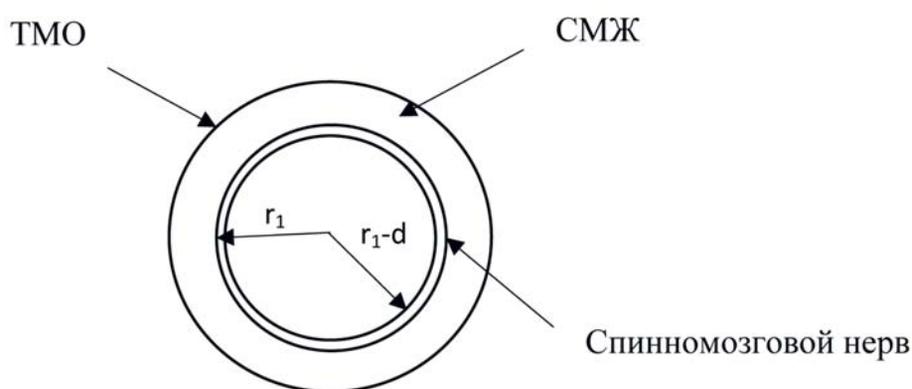


Рис. 5. Схема поперечного сечения спинномозгового нерва, где ΔP=3÷5 мм рт. ст. [4]

Этот подход уже разделяют многие авторы [3]. В рамках инженерной задачи без учета паутинных ворсинок можно провести следующие средние расчеты: используя уравнение Фика и уравнение расхода (оттока) [18] рассчитаем удельную газопроницаемость к оболочке спинномозгового нерва. Средние анатомические параметры его и CO₂: =0,875 Па с вязкостью CO₂ r₁=10⁻³м, r₂ = r₁-d d=0.5 10⁻⁶м, толщина оболочки спинномозгового нерва D=1,24 10⁻⁹

$\text{м}^2/\text{с}$, коэффициент диффузии CO_2 $C_{\text{СМЖ}}=2,48$ ммоль/л, $C_{\text{крови}}=0,65$ ммоль/л. Соответствующие концентрации CO_2 в СМЖ и CO_2 в крови венозного капилляра [19, 20] $h=2 \cdot 10^{-2}\text{м}$

$$Q = \frac{2\pi d \Delta P k}{\ln \frac{r_1}{r_2} \eta} \quad (1)$$

$$Q = JS = D \frac{C_{\text{СМЖ}} - C_{\text{крови}}}{d} 2\pi r_1 h \quad (2)$$

Подставляя (2) в (1) получаем:

$$k = \frac{D \frac{C_{\text{СМЖ}} - C_{\text{крови}}}{d} 2\pi r_1 h \ln \frac{r_1}{r_2} \eta}{4\pi d \Delta P} \quad (3)$$

Итого $Q(\text{CO}_2) = 0.82$ мл/мин, $k = 0,05 \text{ см}^2$.

Таким образом патологии изменяют величину динамических параметров: снижая концентрацию CO_2 и проницаемость оболочки спинномозгового нерва (оттока CO_2), что приводит к ненужному повышению внутричерепного давления (ВЧД). А при физических нагрузках – к избыточному напряжению тканей, т.е. холостому использованию собственной энергии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье приведена визуализация патологий, которая видна на МРТ позвоночника [5,16]. Однако главной патологией остается дисфункция ПДС и стеноз как следствие этой дисфункции либо как самостоятельное нарушение КСМ в черепно-спинальной полости, которые постепенно запускают остальные процессы (рис. 3,4). При глубоких стенозах и множественных опухолях в спинальной полости вполне возможно произойдет сокращение её объема. Возможно, это приведет к соотношению 12-16:1 краниоспинального пространства [11]. Тем не менее без патологий сохранится соотношение 2:1 [3], даже несмотря на то, что внутри спинальной полости существуют дополнительные структуры: спинномозговые нервы, зубчатые связки, паутинные трабекулы. Несложные расчеты показывают, что объем этих структур $6 \times 10^{-6} \text{ м}^3$ [16], компенсирует объем микроспинальной полости $6,5 \times 10^{-6} \text{ м}^3$, всех спинномозговых нервов. Это позволяет остеопатам, мануальным терапевтам и неврологам активно исправлять начальную патологию в виде дисфункции ПДС, регулируя КСМ, и останавливать или снижать вторичные патологии. А самое главное, независимо от возраста, восстанавливать работоспособность спинномозгового нерва, давая возможность мышцам при их тренировке вернуть утраченную силу. Кроме этого приведены расчеты диффузии CO_2 в венозные капилляры спинномозгового нерва через отток (расход) Q и проницаемость оболочки спинномозгового нерва, которые дают объяснения работоспособности спинномозгового нерва (элемента ЦНС). Таким образом, общие рассуждения об оттоке СМЖ, CO_2 в позвоночнике преобразуются в анализ малоизученного механизма ЦНС – функционирования спинномозгового нерва. Это позволяет специалистам и самостоятельно тренирующимся понять, почему применение апробированных алгоритмов тренировок не всегда приводит к желаемым результатам. Также приведенные расчеты дополняют сухую теорию анатомии, преподаваемую в медицинских колледжах и вузах.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Зверев А.Г., Новосельцев, С.В., Якименко О.С. Современный взгляд на теории патологий позвоночника. Мануальная терапия. 2022. № 87(3). С. 56-60.
2. Зверев А.Г., Новосельцев С.В. Якименко О.С. Влияние СМЖ на патологии позвоночника. Мануальная терапия.
3. Pollay M. Review the function and structure of the cerebrospinal fluid outflow system // *Cerebrospinal Fluid Research*. 2010. 7(1):9.
4. Andersson N. Cerebrospinal fluid infusion methods: development and validation on patients with idiopathic normal pressure hydrocephalus. Umea. UMEA University medical dissertations. 2007. New series. № 1116.
5. Sudres P. Biomechanics between the cerebrospinal fluid and the spinal central nervous system: towards a modelling of fluid-structure interactions. 2021.
6. Токарев А.С., Талыпова Д.А., Терёхин И.А., Гринь А.А. Качественная и количественная оценка ликвородинамики // Журнал им. Н.В. Склифосовского «Неотложная медицинская помощь». 2022. № 11(1). С. 86-95.
7. Bert R.J., Settippalle N., Tiwana E. et al. The relationships among spinal CSF flows, spinal cord geometry, and vascular correlations: evidence of intrathecal sources and sinks // *The American Physiological Society*. 2019. P. 470-484.
8. Thea Overgaard Wichmann et al. A Brief Overview of the Cerebrospinal Fluid System and Its Implications for Brain and Spinal Cord Diseases. 2021.
9. Bruno Chikly, Jörgen Quaghebeur, Reassessing Cerebrospinal Fluid (CSF) Hydrodynamics A Literature Review Presenting a Novel Hypothesis for CSF Physiology. *Journal of Bodywork & Movement Therapies*. 2013.
10. Москаленко Ю.Е. и др. Медленноволновые колебания в краниосакральном пространстве: гемоликвородинамическая концепция происхождения // Физиологический журнал России им. И.М. Сеченова. 2008. Том 94, № 4. С. 441-447.
11. Зверев А.Г., Новосельцев С.В., Якименко О.С. Влияние гидродинамических частот на краниосакральный механизм тела человека // Мануальная терапия. 2022. Том 85, № 1. С. 85-92.
12. Brierly J.B. The penetration of particulate matter from the CSF into spinal ganglia peripheral nerves and perivascular space of the CNS // *J. Neurol*. 1950. N15. P. 203-215.
13. Naimark A. et. al. Effect of DLF on gas exchange and CSF A-B State in Chronic CO₂ Respiratory Failure // *Canad Med Ass J*. 1966. Vol. 94.
14. Sass L.R., Khani M., Conley G.A., Natividad et al. A 3D subject-specific model of the spinal subarachnoid space with anatomically realistic ventral and dorsal spinal cord nerve rootlets // *Fluids and Barriers of the CNS*. 2017. Vol. 14(1). P. 1-16.
15. Linninger A.L., Tangen K., Hsu C.-Y., Frim D. Cerebrospinal Fluid Mechanics and Its Coupling to Cerebrovascular Dynamics.
16. Bechter K., Schmitzy B.L. Cerebrospinal fluid outflow along lumbar nerves and possible relevance for pain research: case report and review // *Croatian Medical J*. 2014. №55. P. 399-404.
17. Kido D.K. et al. Human spinal Arachnoid Villi and Granulations // *Neuroradiology*. 1976. Vol. 11. P. 221-228.
18. Иовлева О.В., Ларионов В.М. Основы теплообмена и гидродинамики. Казань : Казанский федеральный университет, 2019.
19. Anik Y., Demirci A., Anik I., Etus V., & Arslan A. Apparent Diffusion Coefficient and Cerebrospinal Fluid Flow Measurements in Patients with Hydrocephalus // *Journal of Computer Assisted Tomography*. 2008. N 32(3). P. 392-396.
20. Корячкин В.А., Эмануэль В.Л., Страшнов В.И. Диагностическая деятельность, 2-е изд., испр. и доп. Москва, 2019. С. 507.

REFERENCES

1. Zverev AG, Novoseltsev SV, Yakimenko OS. A modern view of the theories of the spine pathologies. *Manualnaya Terapiya = Manual Therapy*. 2022;87(3):56-60. (In Russ.)
2. Zverev AG, Novoseltsev SV, Yakimenko OS. The influence of cerebrospinal fluid on the spine pathologies. *Manualnaya Terapiya = Manual Therapy*. (In Russ.)
3. Pollay M. Review the function and structure of the cerebrospinal fluid outflow system. *Cerebrospinal Fluid Research*. 2010;7(1):9.
4. Andersson N. Cerebrospinal fluid infusion methods: development and validation on patients with idiopathic normal pressure hydrocephalus. Umea. UMEA University medical dissertations. 2007;1116 (New series).
5. Sudres P. Biomechanics between the cerebrospinal fluid and the spinal central nervous system: towards a modelling of fluid-structure interactions. 2021.

6. Tokarev AS, Talypova DA, Teryekhin IA, Grin AA. Qualitative and quantitative assessment of liquor dynamics. *Zhurnal imeni N.V. Sklifosovskogo "Neotlozhnaya Meditsinskaya Pomoshch" = N.V. Sklifosovsky Journal of Emergency Medicine*. 2022;11(1):86-95. (In Russ.)
7. Bert RJ, Settippalle N, Tiwana E, et al. The relationships among spinal CSF flows, spinal cord geometry, and vascular correlations: evidence of intrathecal sources and sinks. *The American Physiological Society*. 2019:470-484.
8. Wichmann TO, et al. A Brief Overview of the Cerebrospinal Fluid System and Its Implications for Brain and Spinal Cord Diseases. 2021.
9. Chikly B, Quaghebeur J. Reassessing Cerebrospinal Fluid (CSF) Hydrodynamics. A Literature Review Presenting a Novel Hypothesis for CSF Physiology. *Journal of Bodywork & Movement Therapies*. 2013.
10. Moskalenko YuE, et al. Slow-wave fluctuations in the craniosacral space: a hemo-liquorodynamic concept of origin. *Fiziologicheskii Zhurnal Rossii im. I.M. Sechenova = I.M. Sechenov Russian Journal of Physiology*. 2008;94(4):441-447. (In Russ.)
11. Zverev AG, Novoseltsev SV, Yakimenko OS. The influence of hydrodynamic frequencies on the craniosacral mechanism of a human body. *Manualnaya Terapiya = Manual Therapy*. 2022;85(1):85-92. (In Russ.)
12. Brierly JB. The penetration of particulate matter from the CSF into spinal ganglia peripheral nerves and perivascular space of the CNS. *J. Neurol*. 1950;15:203- 215.
13. Naimark A, et. al. Effect of DLF on gas exchange and CSF A- B State in Chronic CO2 Respiratory Failure. *Canad Med Ass J*. 1966;94.
14. Sass LR, Khani M, Conley GA, Natividad, et al. A 3D subject-specific model of the spinal subarachnoid space with anatomically realistic ventral and dorsal spinal cord nerve rootlets. *Fluids and Barriers of the CNS*. 2017;14(1):1-16.
15. Linninger AL, Tangen K, Hsu C-Y, Frim D. Cerebrospinal Fluid Mechanics and Its Coupling to Cerebrovascular Dynamics.
16. Bechter K, Schmitzy BL. Cerebrospinal fluid outflow along lumbar nerves and possible relevance for pain research: case report and review. *Croatian Medical J*. 2014;55:399-404.
17. Kido DK, et al. Human spinal Arachnoid Villi and Granulations. *Neuroradiology*. 1976;11:221-228.
18. Iovleva OV, Larionov VM. Fundamentals of heat and mass transfer and hydrodynamics. Kazan: Kazan Federal University; 2019. (In Russ.)
19. Anik Y, Demirci A, Anik I, Etus V, Arslan A. Apparent Diffusion Coefficient and Cerebrospinal Fluid Flow Measurements in Patients with Hydrocephalus. *Journal of Computer Assisted Tomography*. 2008;32(3):392–396.
20. Koryachkin VA, Emanuel VL, Strashnov VI. Diagnostic activity. 2nd edition, revised. Moscow; 2019. 507 p. (In Russ.)

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflicts of interest.*

Статья поступила / The article received: 23.08.2024

Статья принята к печати / The article approved for publication: 27.08.2024