

Оригинальная статья / Original article

<https://doi.org/10.21869/2223-1536-2024-14-1-148-160>



УДК 616-073.756.8+611.711.1+616.76-007.43

Компьютерная оценка риска возникновения грыжевых выпячиваний межпозвонковых дисков шеи на основании данных МРТ-исследований

Е. С. Мохова¹✉, А. В. Колсанов²

¹ Северо-Западный государственный медицинский университет имени И. И. Мечникова Минздрава России
ул. Кирочная, д. 41, г. Санкт-Петербург 191015, Российской Федерации

² Самарский государственный медицинский университет Минздрава России
ул. Чапаевская, д. 89, г. Самара 443099, Российской Федерации

✉ e-mail: mokhova-es@mail.ru

Резюме

Цель исследования – оценка риска возникновения грыжевых выпячиваний межпозвонковых дисков С4-С5, С5-С6 и С6-С7 шейного отдела позвоночника по данным МРТ-исследования.

Методы. Изучена биомеханика физиологических процессов этого отдела на основании данных МРТ-исследований. Разработана и апробирована компьютерная программа ЭВМ «Способ оценки риска возникновения грыжевых выпячиваний межпозвонковых дисков шейного отдела позвоночника по результатам МРТ-исследования». Измерения, необходимые для вышеуказанной оценки, получали при оценке МРТ-исследования конкретного пациента, после чего вводили данные в программу. Результаты расчетов сопоставлялись с базой данных, ранее полученной авторами в ходе экспериментального и клинического исследований.

Результаты. Используемая нами модель корректно описывает механические особенности соединения позвонков, так как учитывает наиболее значимые особенности строения их, оказывающие влияние на изменение длин плеч рычагов и силу давления на центр межпозвонкового диска. По данным магниторезонансной томографии, определяли высоту межпозвонкового диска на уровне передних краев тел позвонков и значение AV, вычисляли tg α. Для конкретного пациента получали риск возникновения выпячивания межпозвонкового диска на уровне С4-С5, С5-С6 и С6-С7.

Заключение. Результаты испытания программы оценки риска развития выпячивания межпозвонкового диска в шейном отделе позвоночника позволяют описывать динамические явления в шейном отделе позвоночника и прогнозировать неблагоприятный исход патологии на доклиническом этапе даже при отсутствии клинических проявлений.

Ключевые слова: межпозвонковый диск; оценка риска; риск развития выпячивания межпозвонкового диска; шейный отдел позвоночника; МРТ-исследования.

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

Для цитирования: Мохова Е. С., Колсанов А. В. Компьютерная оценка риска возникновения грыжевых выпячиваний межпозвонковых дисков шеи на основании данных МРТ-исследований // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2024. Т. 14, № 1. С. 148–160. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2024-14-1-148-160>.

Поступила в редакцию 17.01.2024

Подписана в печать 10.02.2024

Опубликована 29.03.2024

Computer Assessment of the Risk of Herniated Protrusions of the Intervertebral Discs of the Neck Based on MRI Data

Ekaterina S. Mokhova^{1✉}, Alexander V. Kolsanov²

¹ North-Western State Medical University named after I. I. Mechnikov Ministry of Health of Russia
41 Kirochnaya Str., St. Petersburg 191015, Russian Federation

² Samara State Medical University Ministry of Health of Russia
89 Chapaevskaya Str., Samara 443099, Russian Federation

✉ e-mail: mokhova-es@mail.ru

Abstract

The purpose of the research is assessment of the risk of herniated protrusions of intervertebral discs C4-C5, C5-C6 and C6-C7 of the cervical spine according to MRI examination.

Methods. The biomechanics of the physiological processes of this department has been studied on the basis of MRI data. A computer program «A method for assessing the risk of herniated protrusions of intervertebral discs of the cervical spine based on the results of an MRI examination» has been developed and tested. The measurements required for the above assessment were obtained during the evaluation of the MRI examination of a particular patient, after which the data was entered into the program. The calculation results were compared with the database previously obtained by the authors in the course of experimental and clinical studies.

Results. The model we use correctly describes the mechanical features of the vertebral junction, since it takes into account the most significant features of their structure, which affect the change in the length of the arms of the levers and the force of pressure on the center of the intervertebral disc. Based on magnetic resonance imaging data, the height of the intervertebral disc at the level of the anterior edges of the vertebral bodies and the AV value were determined, and $\operatorname{tg}\alpha$ was calculated. For a particular patient, the risk of intervertebral disc protrusion was obtained at the C4-C5, C5-C6 and C6-C7 levels.

Conclusion. The test results of the program for assessing the risk of developing an intervertebral disc protrusion in the cervical spine make it possible to describe dynamic phenomena in the cervical spine and predict an unfavorable outcome of pathology at the preclinical stage, even in the absence of clinical manifestations.

Keywords: intervertebral disc; risk assessment; risk of developing a bulging intervertebral disc; cervical spine; MRI studies.

Conflict of interest: The Authors declares the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

For citation: Mohova E. S., Kolsanov A. V. Computer Assessment of the Risk of Herniated Protrusions of the Intervertebral Discs of the Cervical Spine Based on MRI Scans. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Upravlenie, vychislitel'naja tekhnika, informatika. Meditsinskoje priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering.* 2024; 14(1): 148–160. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2024-14-1-148-160>.

Received 17.01.2024

Accepted 10.02.2024

Published 29.03.2024

Введение

С точки зрения биомеханики область шеи является наиболее сложной для детального описания человеческого тела. Взаимодействие окружающей среды с генетическими факторами ускоряет процесс дегенерации межпозвонковых дисков (МПД) [1]. Боль в шее вызвана нагрузкой на межпозвоночные диски, которая может привести к образованию грыжевых выпячиваний МПД с сопутствующим сдавливанием нерва. Из-за своей распространённости и социальных последствий это заболевание считается проблемой общественного здравоохранения [2; 3].

Основными факторами патологии межпозвонковых дисков являются факторы, связанные с родом занятий и профессией (физическая нагрузка, стресс на работе). На биомеханические процессы оказывают влияние и генетические факторы косвенно также. Взаимодействие с генетическими факторами ускоряется процессом дегенерации межпозвонковых дисков [3; 4].

Изучение механизмов дегенеративно-дистрофических процессов в различных структурах позвоночно-двигательного сегмента (ПДС) становится важным для практической деятельности врачей различных профилей и актуальным направлением совершенствования методов диагностики. Воздействие различных факторов повреждения межпозвонковых дисков на пациента, приводящих к образованию грыжевых

выпячиваний, необходимо учитывать при выборе рациональных лечебно-диагностических технологий в каждом конкретном случае. Для диагностики грыжевых выпячиваний МПД обычно используется магнитно-резонансная томография. Выявление грыжевых выпячиваний происходит при снижении интенсивности сигнала от межпозвоночного диска, однако чрезвычайно важна разработка новых методов диагностики риска грыжевых выпячиваний, которые позволяют изучать механизмы дегенеративно-дистрофических процессов в различных анатомических структурах позвоночно-двигательного сегмента. В каждом конкретном случае необходимо понимать основные механизмы повреждения МПД, которые вызывают образование грыжевых выпячиваний, а также разрабатывать лечебно-диагностическую тактику врача при выявлении МПД [4].

Цель исследования – оценка риска возникновения грыжевых выпячиваний межпозвонковых дисков C4-C5, C5-C6 и C6-C7 шейного отдела позвоночника по данным МРТ-исследования.

Материалы и методы

В настоящее время математический анализ и трёхмерное моделирование являются новым перспективным способом получения дополнительной информации, с помощью которых исследователь имеет возможность виртуально наблюдать и моделировать сложные биомеханические явления в изучаемых

виртуальных аналогах вне организма, что безопасно для пациента.

В основу анализа взят способ оценки риска возникновения грыжевых выпячиваний межпозвонковых дисков шейного отдела позвоночника путем МРТ-исследования, описанный в патенте Е. В. Яковлева с соавторами [2] и получивший дальнейшее развитие в нашей совместной работе [4].

Измерения, необходимые для вышеуказанной оценки, получаются при оценке МРТ-исследования конкретного пациента, после чего вводят данные в программу. Результаты сопоставляются с базой данных, ранее полученной авторами в ходе экспериментального и клинического исследований.

Результаты и их обсуждение

При описании патологии шейного отдела позвоночника используется позвоночно-двигательный сегмент, который включает в себя два соседних позвонка, межпозвоночные суставы, межпозвоночный диск, межпозвоночные связки, а также мышцы и фиброзные ткани [5]. Каждый позвоночно-двигательный сегмент в сагиттальной плоскости при стабильных условиях представляет собой систему сбалансированных рычагов с точкой опоры на уровне сустава.

Смещение материала диска за пределы межпозвоночного пространства происходит по следующим основным причинам: изменение нормальной структуры ПДС, дегенерация фиброзного

кольца МПД, увеличение механического фактора – давления на пульпозное ядро. При изучении изолированных биомеханических факторов на первый план выходит трехмерная структура позвонка, поскольку она определяет длины рычагов и векторы направления силы. В повседневной практике дегенеративные изменения МПД оцениваются по двумерным геометрическим и сигнальным характеристикам. Согласно исследованию [6; 7], высота диска при срединно-сагиттальной магнитно-резонансной томографии не является надежным признаком возрастной дегенерации диска. Исследование демонстрирует конечно-элементное моделирование валидированной модели ПДС, которая использовалась для изучения траекторий центра мгновенной скорости при различных степенях дегенерации межпозвонковых дисков [4; 8].

Четкие 3D-модели могут стать новым инструментом для исследований в случае шейного отдела позвоночника [9]. Трехмерные, математические и биомеханические модели важны как средство детального изучения биологического объекта, а также представляют практически огромные возможности в области моделирования различных видов патологий и создания трехмерного визуального изображения для моделирования проведения различных терапевтических и диагностических исследований [10; 11].

Выпячивание грыжи межпозвоночного диска возникает при наличии

следующих факторов: изменении структуры, деградации фиброзного кольца и влиянии механических факторов – давления на пульпозное ядро. Подробный анализ механизма формирования рычага был представлен нами ранее [4].

Представленная модель четко описывает механические особенности позвоночного сустава, так как учитывает наиболее существенные конструктивные

особенности их строения, которые влияют на изменение длины плеч рычага и силы давления на центр межпозвоночного диска.

Для ПДС C4-C5, C5-C6 и C6-C7 в горизонтальных проекциях определяли значения FF1 и O1A (рис. 1).

Значение O1A вычисляли по формуле

$$O_1A = \frac{2}{FF_1} \sqrt{(P(P - FF_1)(P - F_1A)(P - F_A))},$$

где

$$P = \frac{(FA + F_1A + FF_1)}{2}.$$

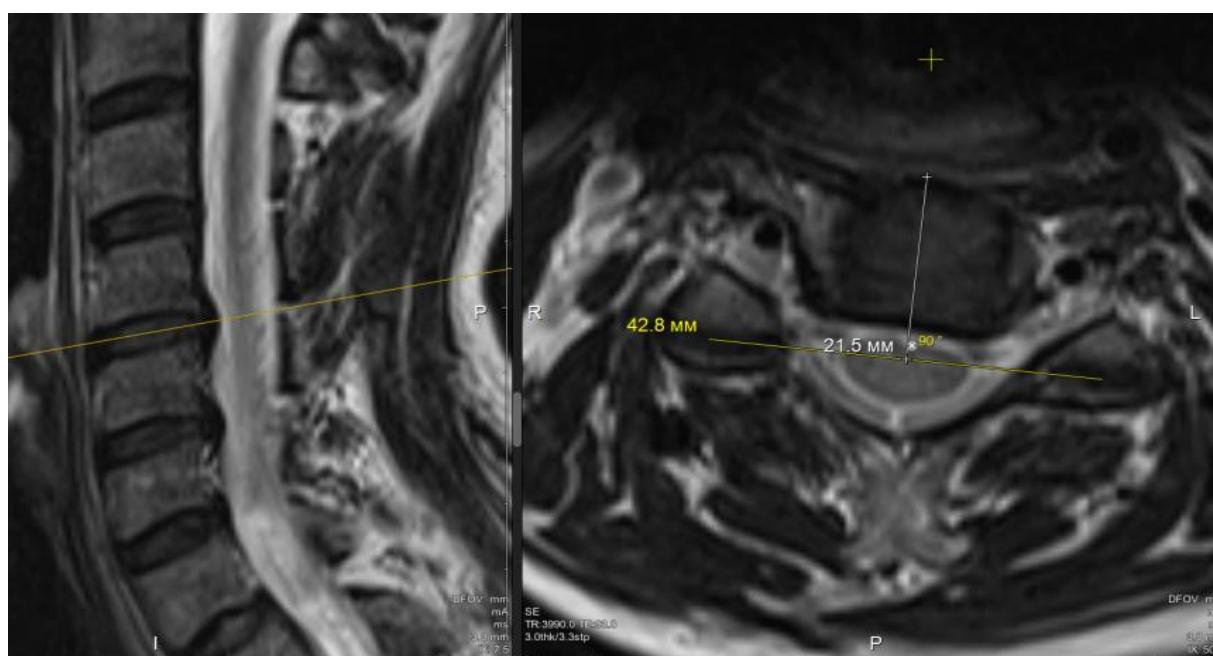


Рис. 1. Определение значения FF1 и O1A в сегменте C5-C6 [4; 12]

Fig. 1. Determination of the value of FF1 and O1A in the C5-C6 segment [4; 12]

По данным магниторезонансной томографии (МРТ), определяли значение высоты межпозвонкового диска на уровне C4-C5, C5-C6 и C6-C7 передних краёв тел позвонков (рис. 2) для всех

ПДС, значение AV, равное 1/2 высоты межпозвонкового диска. Производили вычисления $\operatorname{tg} \alpha = \frac{AV}{O_1A}$ для каждого ПДС [4].

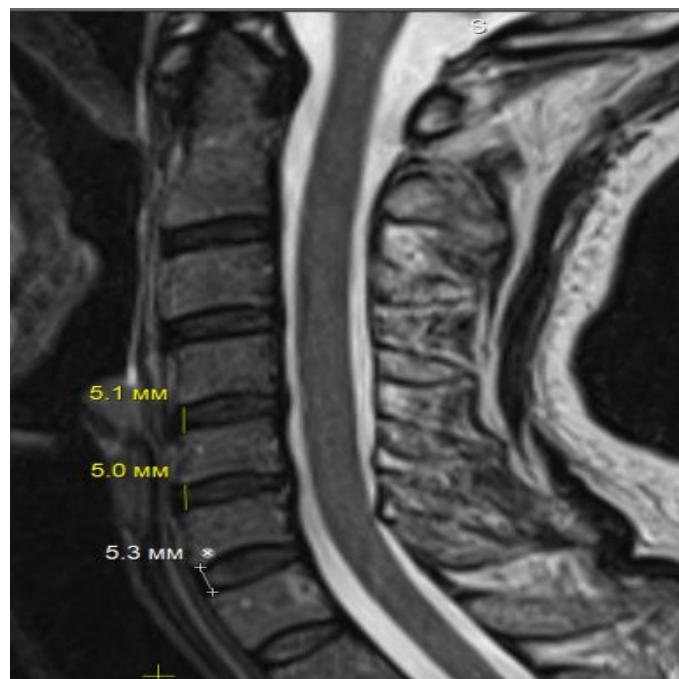


Рис. 2. Определение высоты межпозвонковых дисков на уровне передних краёв тел позвонков

Fig. 2. Determination of the height of the intervertebral discs at the level of the anterior edges of the vertebral bodies

Используя выявленные закономерности, нами создана Программа для биомеханической оценки риска возникновения парамедианных выпячиваний межпозвонковых дисков на основе данных МРТ ALPHATANG 1.0 и получено Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ [4]. С её помощью можно определить степень нарушения в шейном регионе.

Оценивался риск выпячивания следующим образом при значении Х: большем или равном 0,11 – высокий риск; от 0,06 включительно до 0,08 включительно – средний риск; равном 0,05 и ниже – низкий риск.

На ретроспективном материале в программе определялся риск возникновения выпячивания межпозвонкового диска.

Риск возникновения грыжевого выпячивания межпозвонковых дисков C4-C5, C5-C6 и C6-C7 шейного отдела позвоночника в случае, представленном в данной статье, тга составил соответственно 0,118-0,116-0,123. Риск возникновения грыжевого выпячивания межпозвонковых дисков по всем позвонкам был высоким при отсутствии клинических жалоб у пациента.

В данном исследовании была подтверждена формирующаяся патология шейного отдела позвоночника – выход диска за линию, соединяющую соседние позвонки, в исследуемой сагittalном срезе тела приблизился к критическому значению 2,0 мм и составил 1,6–1,8 мм (рис. 3).

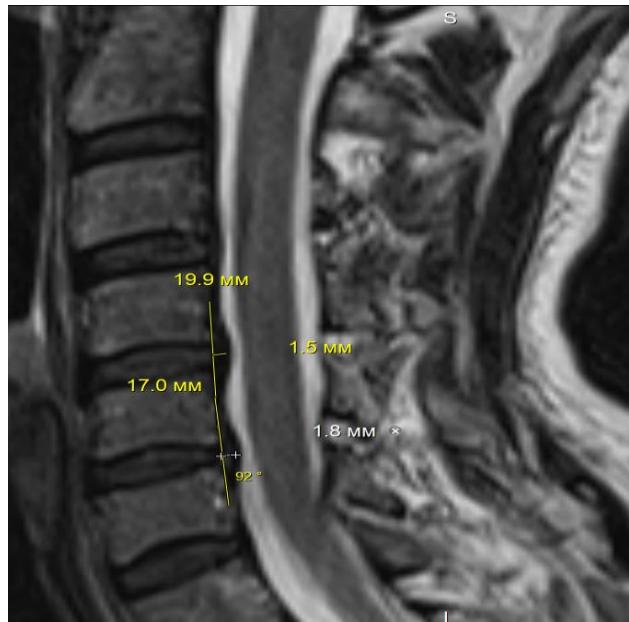


Рис. 3. Определение ширины выпячиваний дисков [4]

Fig. 3. Determination of the width of the disc protrusions [4]

Комплексный подход к описанию объекта исследования позволяет проводить биомеханический анализ. В нем проводится различие между общей биомеханикой (биомеханика клеток, внутренних органов и систем), инженерной биомеханикой (движение и контроль тела, биомеханика предметной среды человека), медицинской биомеханикой (биомеханические аспекты медицинской диагностики и лечения, биомеханика травм и хирургических вмешательств), биомеханика заменителей биологических тканей и биомеханика трудовых и спортивных движений [13]. Мы провели биомеханический анализ только на уровне общей биомеханики шеи, что позволило понять механизм физиологических процессов шеи.

Неоспоримо влияние нестабильности позвонков на развитие различных патологических изменений других

отделов позвоночника, а также на развитие соматической дисфункции других, порой даже значительно удалённых органов и систем.

В исследовании Okada E. et al [12] сообщается, что при проведении МРТ-исследований пациентов без симптомов, возникающих со стороны шейного отдела позвоночника, была значительно более высокая распространенность снижения интенсивности сигнала от межпозвоночного диска и заднего протрузии диска на МРТ шейного отдела позвоночника. Эти результаты убедительно свидетельствуют о том, что у пациентов с МПД наблюдаются дегенеративные изменения в других сегментах позвоночника, и некоторые индивидуальные факторы могут стимулировать дегенерацию диска как в шейном, так и в поясничном отделах позвоночника одновременно.

Goel. A. [14] оценил роль атлантоаксиальной и многоуровневой субаксиальной нестабильности позвоночника как первичной узловой точки патогенеза дегенеративной миелопатии, связанной с заболеванием шейного отдела позвоночника. Подтверждено, что нестабильность атлантоаксиального сустава часто ассоциируется с субаксиальной многоуровневой нестабильностью позвоночника при дегенеративных заболеваниях позвоночника. Показана также роль субаксиальной и атлантоаксиальной нестабильности в патогенезе кифоза шейного отдела позвоночника, связанного с дегенерацией [15].

До настоящего момента были предприняты отдельные попытки описания закономерностей смещения органов и мышечно-фасциальных слоёв шеи при поворотах головы, единой системы описания их механизма, а также способов ранней диагностики патологии этой области, никто из исследователей так и не смог их сформулировать [16; 17]. Используя последние достижения современной науки, нами была сделана попытка создать систему описания сложных динамических процессов в шее с применением данных МРТ и применить методику оценки риска возникновения грыжевых выпячиваний межпозвонковых дисков в клинической практике.

Подводя итоги, можем констатировать, что неоспоримо влияние нестабильности позвонков на развитие

различных патологических изменений различных отделов позвоночника, что лишний раз подтверждает актуальность ранней доклинической диагностике патологии шейного отдела и необходимости выделения группы риска, нуждающейся в углубленном обследовании.

Выводы

1. Математическое моделирование биологических объектов позволяет описать патологический изменения в организме, отражающие реальные биомеханические процессы. Задачей клинического врача на любой стадии развития патологического процесса является разрыв этого патологического круга. Крайне важным является выявление функциональных изменений на ранней доклинической стадии.

2. Данные, полученные в результате исследования, позволили получить математическое описание способа оценки риска возникновения выпячивания межпозвонкового диска.

3. Предложенный способ оценки в программе для ЭВМ риска возникновения выпячивания межпозвонкового диска на основе данных МРТ ALPHATANG 1.0 может снизить риск осложнений при проведении манипуляций в области шеи и играть ведущую роль в выборе метода лечебного реабилитационного воздействия. Оценка рисков возникновения выпячиваний МПД будут иметь большую значимость для врачей широкого профиля.

Список литературы

1. Топографо-анатомический анализ и конечно-элементное моделирование динамических и биомеханических закономерностей смещения мышечно-фасциальных футляров шеи / Е. С. Мохова, Д. Е. Мохов, Е. В. Яковлев, С. А. Живолупов, Д. Ю. Бутко, Р. В. Алиев, И. М. Гасанбеков, А. С. Ведяшкина, А. А. Смирнов // Медицинский совет. 2023. Т. 17, № 6. С. 330–344. <https://doi.org/10.21518/ms2023-061>.
2. Пат. 2795175 Российская Федерация. МПК A61B 6/00. Способ оценки риска возникновения грыжевых выпячиваний межпозвонковых дисков C4-C5, C5-C6 и C6-C7 шейного отдела позвоночника / Яковлев Е. В., Смирнов А. А., Живолупов С. А., Овсепьян А. Л., Гневышев Е. Н., Новиков Р. В. № 0002795175; заявл. 06.07.22; опубл. 28.04.23.
3. Анатомическая оценка изолированного влияния биомеханических факторов на процесс формирования смещений дискового материала за пределы пространства межпозвонковых дисков шейного отдела позвоночника в структуре дорсопатий / Е. В. Яковлев, А. А. Смирнов, С. А. Живолупов, Е. Н. Гневышев, Е. С. Мохова, Ю. А. Тероева, Р. В. Алиев, Д. Е. Мохов, А. Л. Овсепьян // Оперативная хирургия и клиническая анатомия (Пироговский научный журнал). 2022. Т. 6, № 2. С. 32–44. <https://doi.org/10.17116/ioperhirurg2022602132>.
4. Risk Factors of Intervertebral Disc Pathology – A Point of View Formerly and Today – A Review / N. Zielinska, M. Podgórski, R. Haładaj, M. Polgaj, Ł. Olewnik // J. Clin. Med. 2021. N 10(3). P. 409. <https://doi.org/10.3390/jcm10030409>.
5. Кузьмин А. И., Кон И. И., Беленький В. Е. Сколиоз. М.: Медицина, 1981. 272 с.
6. Magnetic Resonance Classification System of Cervical Intervertebral Disk Degeneration: Its Validity and Meaning / A. Suzuki, M. D. Daubs, T. Hayashi, M. Ruangchainikom, C. Xiong, K. Phan, T. P. Scott, J. C. Wang // Clin. Spine Surg. 2017. N 30(5). P. 547–553. <https://doi.org/10.1097/BSD.0000000000000172>.
7. Is it appropriate to measure age-related lumbar disc degeneration on the mid-sagittal MR image? A quantitative image study / X. Hu, M. Chen, J. Pan, L. Liang, Y. Wang // Eur. Spine J. 2018. N 27(5). P. 1073–1081. <https://doi.org/10.1007/s00586-017-5357-3>.
8. The effect of cervical intervertebral disc degeneration on the motion path of instantaneous center of rotation at degenerated and adjacent segments: A finite element analysis / D. Sang, C. F. Du, B. Wu, X. Y. Cai, W. Cui, C. X. Yuchi, T. Rong, H. Sang, B. Liu // Comput. Biol. Med. 2021. N 134. P. 104426. <https://doi.org/10.1016/j.combiomed.2021.104426>.
9. Reconstruction of the Three-dimensional Model of Cervical Vertebrae Segments Based on CT Image and 3D Printing / G. Zhao, G. Jiang, X. Xun Yang, P. Xireayi, E. Wang // Chinese

journal of medical instrumentation. 2019. N 43(6). P. 451–453. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1671-7104.2019.06.016>.

10. Конечно-элементный анализ при моделировании структур сердца и аорты / А. А. Смирнов, А. Л. Овсепьян, П. А. Квиндт, Ф. Н. Палеев, Е. В. Борисова, Е. В. Яковлев // Альманах клинической медицины. 2021. Т. 49, № 6. С. 375–384. <https://doi.org/10.18786/2072-0505-2021-49-043>.

11. Новый подход к изучению пространственной анатомии верхнечелюстных пазух в сравнении с общепринятыми методиками / О. В. Зелева, П. М. Зельтер, А. В. Колсанов, Е. А. Сидоров // Современные проблемы науки и образования. 2022. № 6-1. С. 114. <https://doi.org/10.17513/spno.32214>.

12. Disc degeneration of cervical spine on MRI in patients with lumbar disc herniation: comparison study with asymptomatic volunteers / E. Okada, M. Matsumoto, H. Fujiwara, Y. Toyama // Eur. Spine J. 2011. N 20(4). P. 585–591. <https://doi.org/10.1007/s00586-010-1644-y>.

13. Бегун П. И., Афонин П. Н. Моделирование в биомеханике. М.: Высшая школа, 2004. 389 с.

14. Goel A., Kaswa A., Shah A. Role of Atlantoaxial and Subaxial Spinal Instability in Pathogenesis of Spinal "Degeneration" – Related Cervical Kyphosis // World Neurosurg. 2017. N 101. P. 702–709. <https://doi.org/10.1016/j.wneu.2017.02.063>.

15. Goel A. Role of Subaxial Spinal and Atlantoaxial Instability in Multisegmental Cervical Spondylotic Myelopathy // Acta Neurochir. Suppl. 2019. N 125. P. 71–78. https://doi.org/10.1007/978-3-319-62515-7_11.

16. Biomechanical analysis of the cervical spine segment as a method for studying the functional and dynamic anatomy of the human neck / A. L. Ovsepyan, A. A. Smirnov, E. A. Pustozerov, D. E. Mokhov, E. S. Mokhova, E. M. Trunin, S. S. Dydykin, Yu. L. Vasil'ev, E. V. Yakovlev, S. Budday, F. Paulsen, S. A. Zhivolupov, D. A. Starchik // Ann. Anat. 2022. N 240. P. 151856. <https://doi.org/10.1016/j.aanat.2021.151856>.

17. Reproducing morphological features of intervertebral disc using finite element modeling to predict the course of cervical spine dorsopathy / E. V. Yakovlev, A. L. Ovsepyan, A. A. Smirnov, A. A. Safronova, D. A. Starchik, S. A. Zhivolupov, D. E. Mokhov, E. S. Mokhova, Yu. L. Vasil'ev, S. S. Dydykin // Russian Open Medical Journal. 2022. N 11(1). P. e0118. <https://doi.org/10.15275/rusomj.2022.0118>.

References

1. Mokhova E. S., Mokhov D. E., Yakovlev E. V., Zhivolupov S. A., Butko D. Yu., Aliyev R. V., Hasanbekov I. M., Vedyashkin A. S., Smirnov A. A. Topografo-anatomicheskij

analiz i konechno-elementnoe modelirovanie dinamicheskikh i biomekhanicheskikh zakonomernostej smeshcheniya myshechno-fascial'nyh futlyarov shei [Topographic and anatomical analysis and finite element modeling of dynamic and biomechanical patterns of displacement of musculofacial neck cases]. *Medicinskij sovet = Medical Advice*, 2023, vol. 17, no. 6, pp. 330–344. <https://doi.org/10.21518/ms2023-061>

2. Yakovlev E. V., e. a. Sposob ocenki riska vozniknoveniya gryzhevih vypyachivanij mezhpozvonkovyh diskov S4-S5, S5-S6 i S6-S7 shejnogo otdela pozvonochnika [A method for assessing the risk of herniated protrusions of intervertebral discs C4-C5, C5-C6 and C6-C7 of the cervical spine]. Patent RF, no. 0002795175, 2023.

3. Yakovlev E. V. Smirnov A. A., Zhivolupov S. A., Gnevyshev E. N., Mokhova E. S., Teroeva Yu. A., Aliyev R. V., Mokhov D. E., Ovsepyan A. L. Anatomiceskaya ocenka izolirovannogo vliyanija biomekhanicheskikh faktorov na process formirovaniya smeshchenij diskovogo materiala za predely prostranstva mezhpozvonkovyh diskov shejnogo otdela pozvonochnika v strukture dorsopatij [Anatomical assessment of the isolated influence of biomechanical factors on the formation of disc material displacements beyond the space of intervertebral discs of the cervical spine in the structure of dorsopathies]. *Operativnaya hirurgiya i klinicheskaya anatomiya (Pirogovskij nauchnyj zhurnal) = Operative Surgery and Clinical Anatomy (Pirogov Scientific Journal)*, 2022, vol. 6, no. 2, pp. 32–44. <https://doi.org/10.17116/operhirurg2022602132>

4. Zielinska N., Podgórski M., Haładaj R., Polgøj M., Olewnik Ł. Risk Factors of Intervertebral Disc Pathology – A Point of View Formerly and Today – A Review. *J. Clin Med.*, 2021, vol. 10, no. 3, pp. 409. <https://doi.org/10.3390/jcm10030409>

5. Kuzmin A. I., Kon I. I., Belenky V. E. Skolioz [Scoliosis]. Moscow, Medicine Publ., 1981. 272 p.

6. Suzuki A., Daubs M. D., Hayashi T., Ruangchainikom M., Xiong C., Phan K., Scott T. P., Wang J. C. Magnetic Resonance Classification System of Cervical Intervertebral Disk Degeneration: Its Validity and Meaning. *Clin. Spine Surg.*, 2017, vol. 30, no. 5, pp. 547–553. <https://doi.org/10.1097/BSD.0000000000000172>

7. Hu X., Chen M., Pan J., Liang L., Wang Y. Is it appropriate to measure age-related lumbar disc degeneration on the mid-sagittal MR image? A quantitative image study. *Eur. Spine J.*, 2018, vol. 27, no. 5, pp. 1073–1081. <https://doi.org/10.1007/s00586-017-5357-3>

8. Sang D., Du C. F., Wu B., Cai X. Y., Cui W., Yuchi C. X., Rong T., Sang H., Liu B. The effect of cervical intervertebral disc degeneration on the motion path of instantaneous center of rotation at degenerated and adjacent segments: A finite element analysis. *Comput. Biol. Med.*, 2021, no. 134, pp. 104426. <https://doi.org/10.1016/j.combiomed.2021.104426>

9. Zhao G., Jiang G., Xun Yang X., Xireayi P., Wang E. Reconstruction of the Three-dimensional Model of Cervical Vertebrae Segments Based on CT Image and 3D Printing.

10. Smirnov A. A., Ovsepyan A. L., Quindt P. A., Paleev F. N., Borisova E. V., Yakovlev E. V. Konechno-elementnyj analiz pri modelirovaniu struktur serdca i aorty [Finite element analysis in modeling the structures of the heart and aorta]. *Al'manah klinicheskoy mediciny = Almanac of Clinical Medicine*, 2021, vol. 49, no. 6, pp. 375–384. <https://doi.org/10.18786/2072-0505-2021-49-043>

11. Zeleva O. V., Zelter P. M., Kolsanov A. V., Sidorov E. A. Novyj podhod k izucheniyu prostranstvennoj anatomii verhnechelyustnyh pazuh v srovnennii s obshchepriinyatymi metodami [A new approach to the study of the spatial anatomy of the maxillary sinuses in comparison with conventional techniques]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya = Modern Problems of Science and Education*, 2022, no. 6-1, pp. 114. <https://doi.org/10.17513/spno.32214>

12. Okada E., Matsumoto M., Fujiwara H., Toyama Y. Disc degeneration of cervical spine on MRI in patients with lumbar disc herniation: comparison study with asymptomatic volunteers. *Eur. Spine J.*, 2011, vol. 20, no. 4, pp. 585–591. <https://doi.org/10.1007/s00586-010-1644-y>

13. Begun P. I., Afonin P. N. Modelirovanie v biomekhanike [Modeling in biomechanics]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2004. 389 p.

14. Goel A., Kaswa A., Shah A. Role of Atlantoaxial and Subaxial Spinal Instability in Pathogenesis of Spinal "Degeneration"-Related Cervical Kyphosis. *World Neurosurg*, 2017, no. 101, pp. 702–709. <https://doi.org/10.1016/j.wneu.2017.02.063>

15. Goel A. Role of Subaxial Spinal and Atlantoaxial Instability in Multisegmental Cervical Spondylotic Myelopathy. *Acta Neurochir. Suppl.*, 2019, no. 125, pp. 71–78. https://doi.org/10.1007/978-3-319-62515-7_11

16. Ovsepyan A. L., Smirnov A. A., Pustozerov E. A., Mokhov D. E., Mokhova E. S., Trunin E. M., Dydykin S. S., Vasil'ev Yu. L., Yakovlev E. V., Budday S., Paulsen F., Zhivotulov S. A., Starchik D. A. Biomechanical analysis of the cervical spine segment as a method for studying the functional and dynamic anatomy of the human neck. *Ann. Anat.*, 2022, no. 240, pp. 151856. <https://doi.org/10.1016/j.aanat.2021.151856>

17. Yakovlev E. V., Ovsepyan A. L., Smirnov A. A., Safranova A. A., Starchik D. A., Zhivotulov S. A., Mokhov D. E., Mokhova E. S., Vasil'ev Yu. L., Dydykin S. S. Reproducing morphological features of intervertebral disc using finite element modeling to predict the course of cervical spine dorsopathy. *Russian Open Medical Journal*, 2022, vol. 11, no. 1, p. e0118. <https://doi.org/10.15275/rusomj.2022.0118>

Информация об авторах / Information about the Authors

Мохова Екатерина Степановна,
ассистент кафедры остеопатии с курсом
функциональной и интегративной медицины,
Северо-Западный государственный
медицинский университет имени
И. И. Мечникова Минздрава России,
г. Санкт-Петербург, Российская Федерация,
e-mail: mokhova-es@mail.ru,
ORCID: 0000-0002-1079-388X

Колсанов Александр Владимирович,
заведующий кафедрой оперативной хирургии
и клинической анатомии с курсом
медицинских информационных технологий,
Самарский государственный медицинский
университет Минздрава России,
г. Самара, Российская Федерация,
e-mail: a.v.kolsanov@samsmu.ru,
ORCID: 0000-0002-4144-7090

Ekaterina S. Mokhova, Assistant
of the Department of Osteopathy with a Course
of Functional and Integrative Medicine,
North-Western State Medical University named
after I. I. Mechnikov Ministry of Health of Russia,
Saint-Petersburg, Russian Federation,
e-mail: mokhova-es@mail.ru,
ORCID: 0000-0002-1079-388X

Alexander V. Kolsanov,
Head of the Department of Operative Surgery
and Clinical Anatomy with a Course
of Medical Information Technologies,
Samara State Medical University
Ministry of Health of Russia,
Samara, Russian Federation,
e-mail: a.v.kolsanov@samsmu.ru,
ORCID: 0000-0002-4144-7090