# ORIGINAL PAPERS

# ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

DOI: 10.56871/MTP.2024.52.40.001
УДК 616.83+615.84+615.825.1+612.76+004.94

## ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОГО АНАЛИЗА В ИЗУЧЕНИИ ПРЕДИКТОРОВ РЕАБИЛИТАЦИОННОГО ПОТЕНЦИАЛА У ПАЦИЕНТОВ С ШЕЙНОЙ ДИСКОГЕННОЙ РАДИКУЛОПАТИЕЙ

*© Евгений Васильевич Яковлев[1, 4], Сергей Анатольевич Живолупов[3], Дмитрий Юрьевич Бутко[1], Елизавета Сергеевна Конева[2], Владимир Станиславович Василенко[1], Евгений Николаевич Гневышев[4], Алексей Трофимович Давыдов[1]*

[1] Санкт-Петербургский государственный педиатрический медицинский университет. 194100, г. Санкт-Петербург, ул. Литовская, 2
[2] Первый Московский государственный медицинский университет имени И.М. Сеченова (Сеченовский Университет), 119991, г. Москва, Трубецкая ул., 8, стр. 2
[3] Военно-медицинская академия имени С.М. Кирова. 194044, г. Санкт-Петербург, ул. Академика Лебедева, 6
[4] Институт прикладного психоанализа и психологии Автономной некоммерческой организации высшего образования «Университет при Межпарламентской Ассамблее ЕврАзЭС». 199226, г. Санкт-Петербург, Галерный пр., 3

**Контактная информация:** Евгений Васильевич Яковлев — к.м.н., доцент, доцент кафедры медицинской реабилитации и спортивной медицины. E-mail: vmeda-ev@mail.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8435-7562 SPIN: 9681-1798

***Для цитирования:*** Яковлев Е.В., Живолупов С.А., Бутко Д.Ю., Конева Е.С., Василенко В.С., Гневышев Е.Н., Давыдов А.Т. Перспективы применения конечно-элементного анализа в изучении предикторов реабилитационного потенциала у пациентов с шейной дискогенной радикулопатией // Медицина: теория и практика. 2024. Т. 9. № 2. С. 5–13. DOI: https://doi.org/10.56871/MTP.2024.52.40.001

***Поступила: 20.01.2024*** ***Одобрена: 22.04.2024*** ***Принята к печати: 27.05.2024***

**РЕЗЮМЕ.** ***Введение.*** Использование методов конечно-элементного анализа в неврологической практике позволит выявить информативные признаки реабилитационного потенциала для выбора дальнейшей тактики восстановительного лечения пациентов с шейной дискогенной радикулопатией. ***Цель*** — изучить возможности конечно-элементного анализа для определения предикторов реабилитационного потенциала у пациентов с шейной дискогенной радикулопатией при ротационных нагрузках. ***Материалы и методы.*** На основании данных магнитно-резонансной томографии пациента 38 лет (мужчина) генерировалась модель позвоночно-двигательного сегмента $C_5$–$C_7$, включавшая: соответствующие позвонки, межпозвонковый диск, продольные связки, комбинированные дугоотростчатые суставы и спинной мозг. Средствами компьютерного моделирования и методом конечных элементов осуществлялся анализ напряженно-деформированного состояния шейного отдела позвоночника у пациента с шейной дискогенной радикулопатией при ротационной нагрузке. Полученные данные сравнивались с ранее проведенными экспериментальными исследованиями с применением средств компьютерной симуляции и клиническими особенностями течения шейной дискогенной радикулопатии. ***Результаты.*** Исследованы взаимоотношения костно-хрящевых структур позвоночника со спинномозговыми корешками и веществом спинного мозга, получены эпюры напряжений по Мизесу. При повороте антропоморфмной модели в левую сторону выявлены диско-радикулярные конфликты на уровне межпозвонкового диска $C_6$–$C_7$

с наружной заднебоковой поверхностью межпозвонкового диска. При ротации модели вправо выявлен диско-радикулярный конфликт корешков спинного мозга в фораминальных зонах на уровне дисков $C_5$–$C_6$ и $C_6$–$C_7$ с наружной заднебоковой поверхностью межпозвонкового диска. На основании полученных данных о напряжениях по Мизесу в шейном позвоночно-двигательном сегменте прогнозировался дальнейший «каскад» дегенеративно-дистрофических процессов при ротационных нагрузках. Качественный анализ, включавший сопоставление клинических данных, коррелировал с данными компьютерного воспроизведения. ***Выводы.*** Применение конечно-элементного анализа в моделировании шейного отдела позвоночника у пациентов с дискогенной радикулопатией позволяет изучать физические особенности (предельные значения напряжения по Мизесу) течения осложненных форм шейной дорсопатии (радикулопатия), что создает предпосылки в изучении информативных прогностических признаков восстановления у данной категории пациентов.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** компьютерное моделирование, прогнозирование течения дорсопатии, конечно-элементный анализ, шейная радикулопатия, боль в шее

# PROSPECTS FOR THE APPLICATION OF FINITE ELEMENT ANALYSIS IN THE STUDY OF PREDICTORS OF REHABILITATION POTENTIAL IN PATIENTS WITH CERVICAL DISCOGENIC RADICULOPATHY

*© Evgeny V. Yakovlev[1, 4], Sergey A. Zhivolupov[3], Dmitry Yu. Butko[1], Elizaveta S. Koneva[2], Vladimir S. Vasilenko[1], Evgeny N. Gnevyshev[4], Alexey T. Davydov[1]*

[1] Saint Petersburg State Pediatric Medical University. 2 Lithuania, Saint Petersburg 194100 Russian Federation
[2] I.M. Sechenov First Moscow State Medical University (Sechenov University). 8 building 2 Trubetskaya str., Moscow 119991 Russian Federation
[3] Military Medical Academy named after S.M. Kirov. 6 Akademician Lebedev str., Saint Petersburg 194044 Russian Federation
[4] Institute of Applied Psychoanalysis and Psychology of the Autonomous Non-profit Organization of Higher Education "University at the Interparliamentary Assembly of EurAsEC". 3 Galerny ave., Saint Petersburg 199226 Russian Federation

**Contact information:** Evgeny V. Yakovlev — Candidate of Medical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Medical Rehabilitation and Sports Medicine. E-mail: vmeda-ev@mail.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8435-7562 SPIN: 9681-1798

***For citation:*** Yakovlev EV, Zhivolupov SA, Butko DYu, Koneva ES, Vasilenko VS, Gnevyshev EN, Davydov AT. Prospects for the application of finite element analysis in the study of predictors of rehabilitation potential in patients with cervical discogenic radiculopathy. Medicine: Theory and Practice. 2024;9(2):5–13. DOI: https://doi.org/10.56871/MTP.2024.52.40.001

***Received: 20.01.2024*** ***Revised: 22.04.2024*** ***Accepted: 27.05.2024***

**ABSTRACT.** ***Introduction.*** The use of finite element analysis methods in neurological practice will reveal informative signs of rehabilitation potential for choosing further tactics of restorative treatment of patients with cervical discogenic radiculopathy. ***Purpose*** — to study the possibilities of finite element analysis to determine predictors of rehabilitation potential in patients with cervical discogenic radiculopathy under rotational loads. ***Materials and methods.*** Based on the magnetic resonance imaging data of a 38-year-old patient (male), a model of the $C_5$–$C_7$ spinal motor segment was generated, including: the corresponding vertebrae, intervertebral disc, longitudinal ligaments, combined arched joints and spinal cord. By means of computer modeling and the finite element method, the stress-strain state of the cervical spine was analyzed in a patient with cervical discogenic radiculopathy under rotational load. The obtained data were compared with previously conducted experimental studies using computer simulation tools and clinical features of the course of cervical discogenic radiculopathy. ***Results.*** The relationship of bone-cartilaginous structures of the spine with spinal roots and spinal cord matter has been studied, stress diagrams by Mises have been obtained. When the anthropomorphic model was rotated to the left, disco-radicular conflicts were revealed at the level of the intervertebral disc $C_6$–$C_7$ with

the outer posterolateral surface of the intervertebral disc. When rotating the model to the right, a disco-radicular conflict of spinal cord roots in foraminal zones at the level of discs $C_5$–$C_6$ and C6–C7 with the outer posterolateral surface of the intervertebral disc. Based on the obtained data on Mises stresses in the cervical vertebral-motor segment, a further "cascade" of degenerative-dystrophic processes under rotational loads was predicted. The qualitative analysis, which included a comparison of clinical data, corresponded with computer reproduction data. ***Conclusion.*** The use of finite element analysis in modeling the cervical spine in patients with discogenic radiuclopathy allows us to study the physical features (Mises stress limits) of the course of complicated forms of cervical dorsopathy (radiculopathy), which creates prerequisites for the study of informative prognostic signs of recovery in this category of patients.

**KEYWORDS:** computer modeling, predicting the course of dorospathy, finite element analysis, cervical radiculopathy, neck pain

## ВВЕДЕНИЕ

Существующие современные методы визуализации и компьютерного моделирования позволяют анализировать биомеханические взаимодействия структур шейного отдела позвоночника [17]. Методы вычислительного моделирования позволяют лучше понять процесс деформации тканей шейного сегмента человека [2, 3, 6, 7, 16]. Широко используются различные методы научного и практического изучения, в том числе двойная система рентгеноскопической визуализации и методов регистрации 3D-to-2D, высокоскоростная видеосъемка, экспериментальный и вычислительный биомеханический анализ имитируемых столкновений [4–6, 8, 16].

Особое место занимают конечно-элементные модели шеи человека, которые широко используются в изучении и прогнозировании изменений тканей позвоночника в ответ на травму. Изучаются деформации суставного хряща и капсульной связки фасеточных суставов, сужение суставной щели фасеточных суставов, деформации межпозвонковых дисков в сочетании с данными кинематики головы при заднем и фронтальном ударе [1, 4, 10, 11]. Большое количество исследований количественно подтверждают эффективность применения компьютерного моделирования и конечно-элементного анализа в предоперационном планировании, анализе диапазона движений в позвоночнике, анализе напряжений в фасеточных суставах, межпозвонковых дисках, связках и спинном мозге [10, 12]. Конечно-элементный анализ применяется также в изучении особенностей течения и патогенетических механизмов цервикальной спондилогенной миелопатии [13, 14]. Результаты демонстрируют, что при анализе реакции спинного мозга на компрессию возраст пациентов является важным фактором, который следует учитывать в дополнение к степени компрессии, скорости компрессии и коэффициенту компрессии сегментов спинного мозга [15]. Моделирование методом конечных элементов достаточно широко используется для предоперационного планирования в спинальной хирургии и позволяет прогнозировать распределение нагрузки на структуры позвоночника, нервных корешков и спинного мозга после оперативного вмешательства с фиксацией структур [15–17].

Однако, несмотря на информативность конечно-элементного метода в вопросах прогнозирования и в изучении биомеханики позвоночника, влияния на структуры нервной системы, имеются некоторые проблемы в клиническом применении данного метода, а именно высокие вычислительные и временные затраты [9, 10]. Это напрямую связано с отсутствием общепринятых рекомендаций в задачах компьютерного моделирования напряженно-деформированного состояния опорно-двигательной системы [13, 16].

## ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Цель — изучить возможность конечно-элементного анализа для определения предикторов реабилитационного потенциала у пациентов с шейной дискогенной радикулопатией при ротационных нагрузках.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

С письменного информированного согласия пациента (мужчина, 38 лет) применялись данные магнитно-резонансной томографии (МРТ) (08.10.2023 г.) с диагностированной шейной дискогенной радикулопатией (М 50.1). Магнитно-резонансная (МР) диагностика прово-

дилась на магнитно-резонансном томографе SIEMENS ESPREE 1.5T по протоколу МР-исследования шейного отдела позвоночника. Получены изображения: Loc/scout, T2 tse cor, T2 tse sag, T2 tse tra, T1 sag, T2 sag, TIRM, T2 sag с толщиной среза от 1,0 мм. Последовательно генерировалась мультипланарная реконструкция зоны интереса. STL (stereolithography)-модели позвонков и межпозвонкового диска (МПД) комбинировались, после чего выполнялось обратное проектирование. Обратный инжиниринг STL-моделей осуществлялся в программном обеспечении (ПО) SolidWorks. Средствами утилиты ScanTo3D сгенерированы NURBS (Non-uniform rational B-spline)-модели позвонков, межпозвонковых дисков; продольные связки и дугоотростчатые суставы моделировались с помощью стандартных инструментов ПО SolidWorks. Структуры спинного мозга моделировались как двухкомпонентная структура, состоящая из твердой мозговой оболочки и объема ее внутренней области. Трехмерная модель генерировалась из контуров, выделенных на аксиальных и сагиттальных срезах МРТ в районах межпозвонковых дисков.

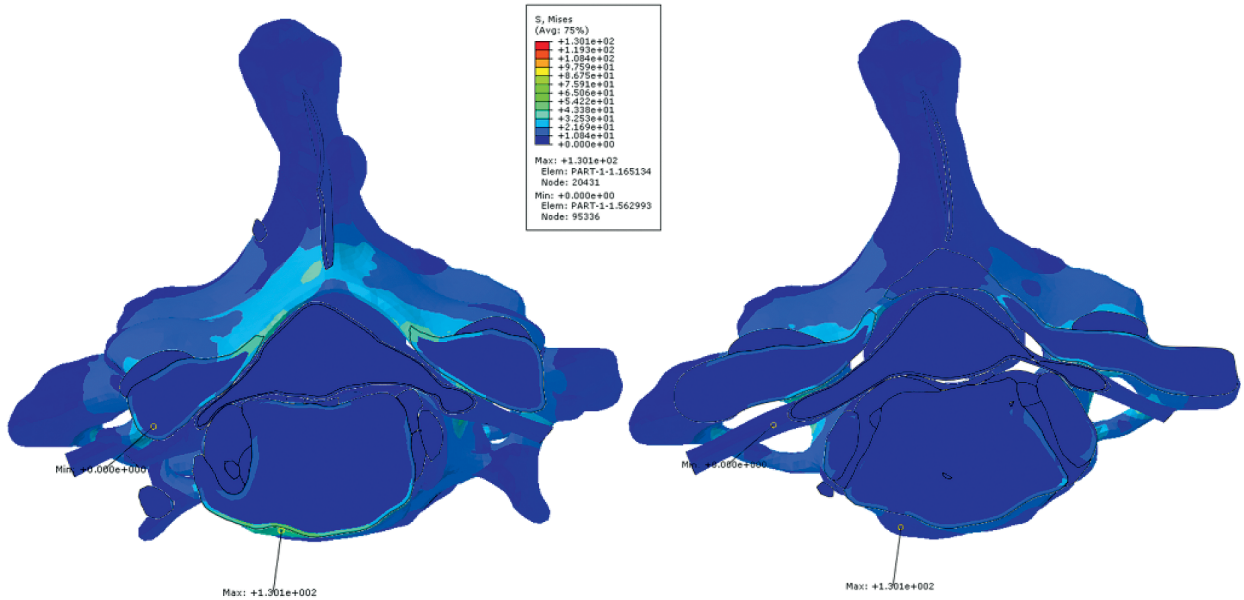
Предобработка NURBS-модели для конечно-элементного анализа проводилась в ПО HyperMesh. Полученные конечно-элементные модели импортировались как орфанные сетки в ПО Abaqus CAE для задания механических свойств материалам и постановки граничных условий для биомеханического анализа модели.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследовалось два варианта ротации в шейном отделе позвоночника: поворот вправо и поворот влево при моменте сил 300 Ньютон-метров (Н·м). При повороте антропоморфной модели вправо наблюдались конфликты спинномозговых корешков с костными структурами позвонков на уровне межпозвонковых дисков $C_5$–$C_6$ и $C_6$–$C_7$ с левыми заднебоковыми поверхностями фиброзных колец (рис. 1). При этом предельные нагрузки по Мизесу концентрировались в левой части кортикального слоя тел позвонков.

Картина распределения напряжений в межпозвонковом диске представлена на рисунке 2. Предельные значения напряжений были локализованы под краевыми остеофитами по всей периферии межпозвонкового диска. Фокальный максимум напряжений находился в передней зоне фиброзного кольца диска $C_5$–$C_6$, под краевым разрастанием в передней части тела позвонка — 10±1 мегапаскаль (МПа).

Для оценки степени вовлеченности спинного мозга в «конфликты» с окружающими анатомическими структурами при ротации вправо строились эпюры напряжений по Мизесу




*а/a* *б/b*

Рис. 1. Усредненные эпюры напряжений по Мизесу при ротации шейного сегмента вправо: *а* — аксиальный разрез на уровне корешков $C_5$–$C_6$; *б* — аксиальный разрез на уровне нервных корешков $C_6$–$C_7$

Fig. 1. Averaged stress plots by Mises during rotation of the cervical segment to the right: *a* — an axial incision at the level of the $C_5$–$C_6$ roots; *b* — an axial incision at the level of the $C_6$–$C_7$ nerve roots

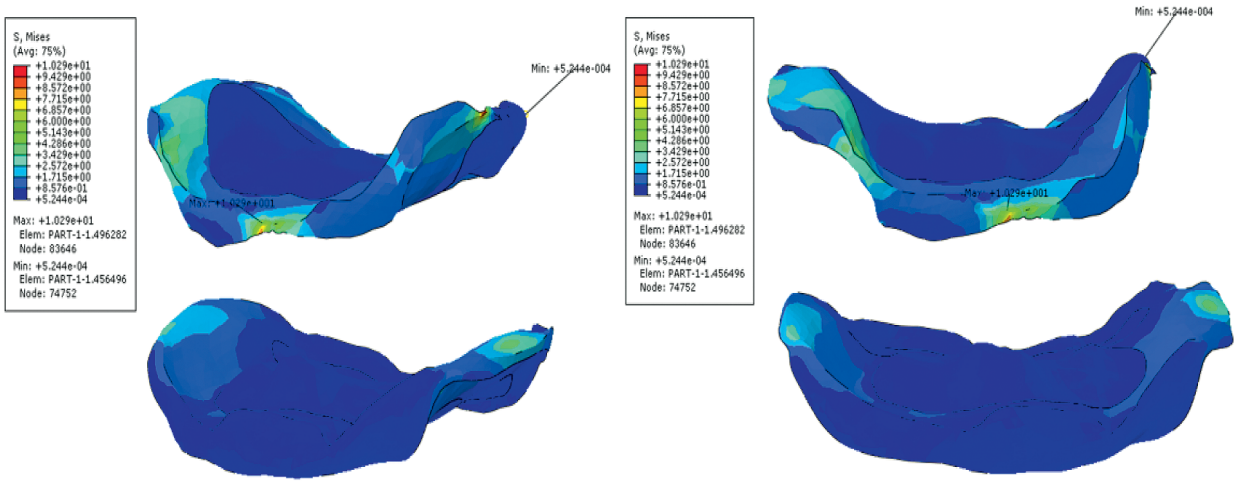
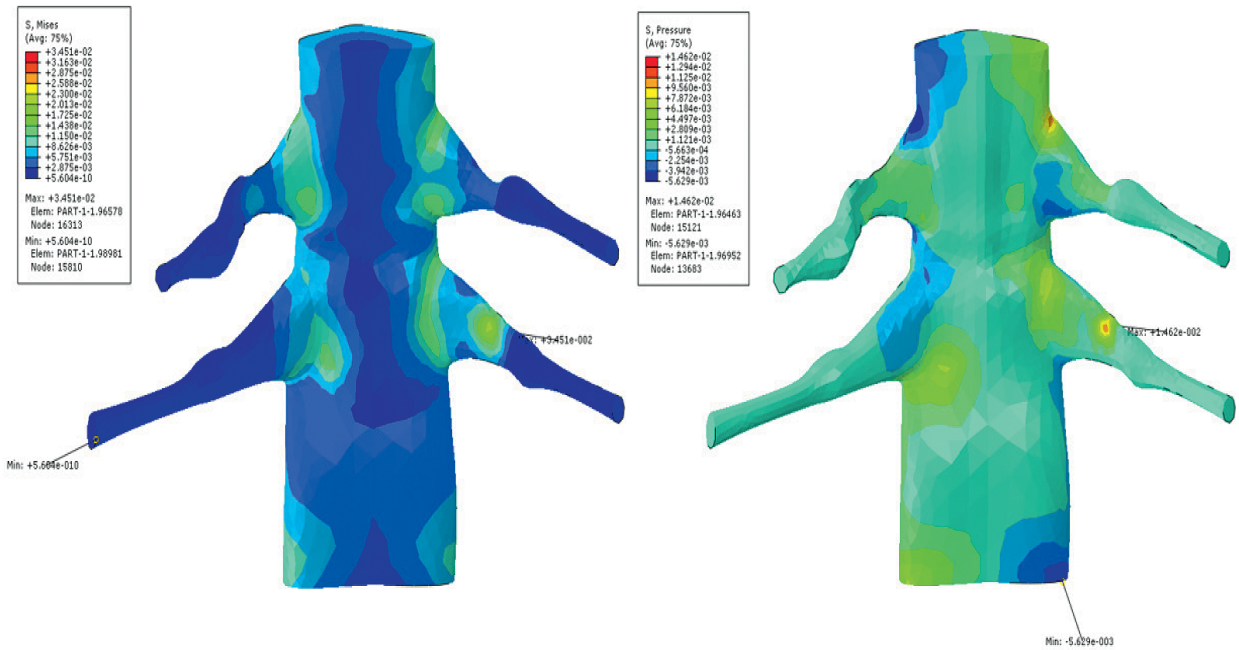



Рис. 2. Усредненные эпюры напряжений по Мизесу в межпозвонковых дисках при ротации вправо (шейные сегменты $C_5$–$C_7$)

Fig. 2. Averaged stress plots by Mises in intervertebral discs during rotation to the right (cervical segments $C_5$–$C_7$)




*а/a* *б/b*

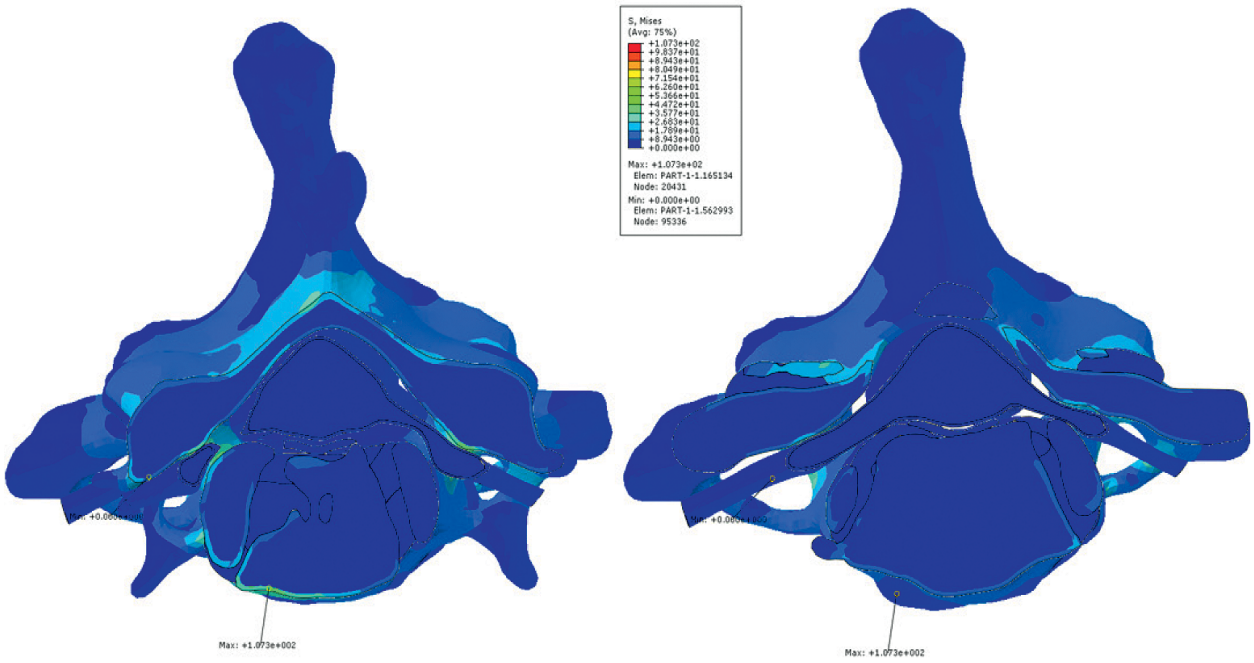
Рис. 3. Усредненные эпюры напряжений по Мизесу (*а*) и давления (*б*) во внутреннем объеме твердой мозговой оболочки при ротации вправо на уровне позвоночно-двигательного сегмента $C_5$–$C_7$ (вид спереди)

Fig. 3. Averaged stress plots by Mises stresses (*a*) and pressure (*b*) in the inner volume of the dura mater during rotation to the right at the level of the spinal motor segment $C_5$–$C_7$ (front view)

и давления для объема внутренней области твердой мозговой оболочки (рис. 3). Предельные значения напряжений и давления в обоих случаях концентрировались в зонах грыжевого выпячивания $C_5$–$C_6$ (правая заднебоковая грыжа), в левой задней парамедианной зоне $C_5$–$C_6$ и в области диффузного выпячивания диска $C_6$–$C_7$ слева.

При повороте модели влево наблюдались конфликты спинного мозга на уровне диска $C_6$–$C_7$ с наружной заднебоковой поверхностью межпозвонкового диска. Предельные нагрузки по Мизесу концентрировались в левой части кортикального слоя тел позвонков (рис. 4).

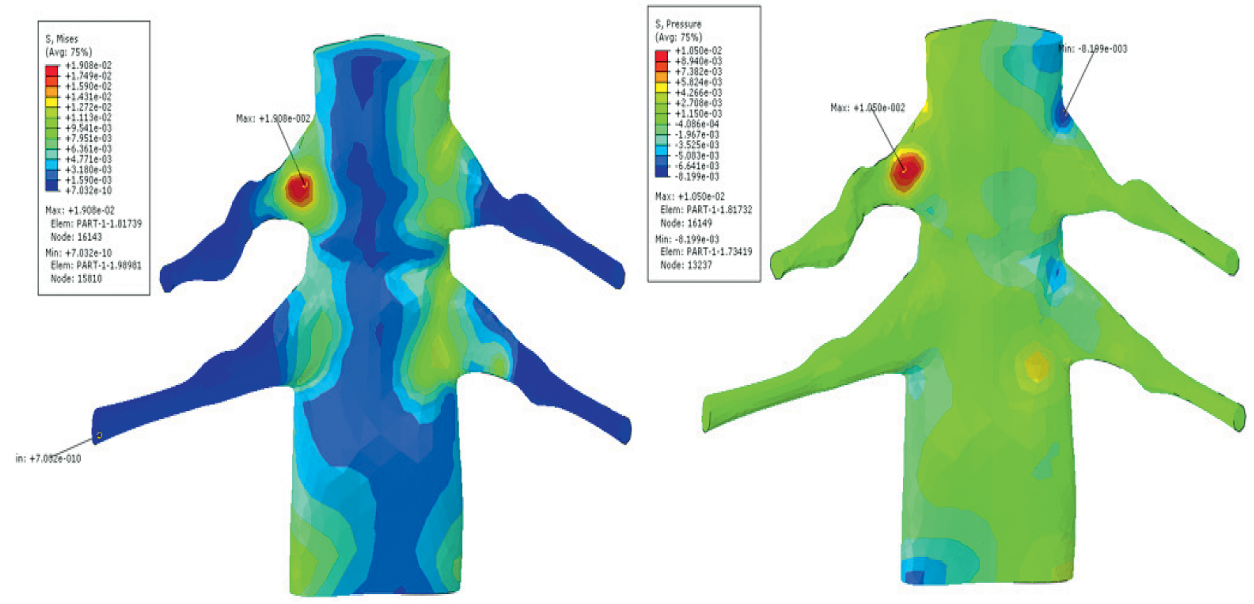
На рисунке 5 проиллюстрированы эпюры напряжений по Мизесу (*а*) и давления (*б*)




*а/a* *б/b*

Рис. 4. Усредненные эпюры напряжений по Мизесу при ротации сегмента влево: *а* — аксиальный разрез на уровне спинномозгового корешка $C_5$–$C_6$; *б* — аксиальный разрез на уровне нервных корешков $C_6$–$C_7$

Fig. 4. Averaged stress plots by Mises when rotating the segment to the left: *a* — an axial incision at the level of the spinal canal $C_5$–$C_6$; *b* — an axial incision at the level of the nerve roots $C_6$–$C_7$




*а/a* *б/b*

Рис. 5. Усредненные эпюры напряжений по Мизесу (*а*) и давления (*б*) во внутреннем объеме твердой мозговой оболочки при ротации влево на уровне позвоночно-двигательного сегмента $C_5$–$C_7$ (вид спереди)

Fig. 5. Averaged plots by Mises stresses (*a*) and pressure (*b*) in the inner volume of the dura mater during rotation to the left at the level of the spinal motor segment $C_5$–$C_7$ (front view)

во внутреннем объеме твердой мозговой оболочки при ротации влево. Выявлена выраженная нагрузка в районе левого корешка на уровне $C_5$–$C_6$ — 0,019 МПа. Максимальное давление наблюдалось в той же области — 0,01 МПа.

Биомеханический качественный анализ напряженно-деформированного состояния при моделировании ротационных нагрузок в шейных сегментах на уровне $C_5$–$C_7$ определил максимальные показатели эпюр напряжения в зоне сдавления спинномозгового корешка слева, что подтверждалось типичными клиническими проявлениями шейной дискогенной радикулопатии и данными результатов МРТ.

Необходимо отметить тот факт, что зона напряжения распространялась на соседние анатомические образования, в том числе на вещество спинного мозга, а не только в месте диско-корешкового конфликта. Данное обстоятельство указывает на то, что патологический процесс носит убиквитарный характер нейродинамических изменений при шейной дискогенной радикулоишемии. При этом по данным снимков МР-исследования такого рода ишемические изменения в структурах спинного мозга не визуализировались.

Выявлена сниженная осевая подвижность исследуемого позвоночно-двигательного сегмента в сравнении с результатами эксперимента *in silico* с аналогичными граничными условиями и моделями материалов. Данное обстоятельство связано с тем, что подвижность шейного сегмента определяется особенностью геометрии анатомических структур пациента, которая, несомненно, меняется в условиях патологии.

## ВЫВОДЫ

Конечно-элементный анализ напряженно-деформированного состояния шейного отдела позвоночника при ротационных нагрузках у пациента с подтвержденной шейной дискогенной радикулопатией представляется инновационным направлением научных разработок в данной области, поскольку является прижизненным неинвазивным методом нейровизуализации структур опорно-двигательного аппарата и нервной системы в различных состояниях (при ротации, компрессии, флексии и разгибании), который, наряду со структурными методами (МРТ), позволяет изучать патологические изменения в данных анатомических объектах.

Применение конечно-элементного персонализированного анализа шейного отдела позвоночника с осложненными формами шейной радикулопатии перспективно как для проведения научных исследований, так и для клинико-неврологического анализа пациентов с дискогенной радикулопатией и позволяет подвести научную базу для определения источника болевой импульсации, а также дальнейшей идентификации предикторов реабилитационного потенциала.

## ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

**Вклад авторов.** Все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией.

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

**Источник финансирования.** Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

**Информированное согласие на публикацию.** Авторы получили письменное согласие пациента на публикацию медицинских данных.

## ADDITIONAL INFORMATION

**Author contribution.** Thereby, all authors made a substantial contribution to the conception of the study, acquisition, analysis, interpretation of data for the work, drafting and revising the article, final approval of the version to be published and agree to be accountable for all aspects of the study.

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

**Funding source.** This study was not supported by any external sources of funding.

**Consent for publication.** Written consent was obtained from the patient for publication of relevant medical information within the manuscript.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Искра Д.А., Бутко Д.Ю. Уридин и уридинсодержащие комплексы при неспецифической боли в спине. От патогенеза к лечению. Нервные болезни. 2020;4:20–24. DOI: 10.24412/2226-0757-2020-12241.
2. Agarwal Aakash & Agarwal Anand. The Endplate Morphology Changes with Change in Biomechanical Environment Following Discectomy. Int. J. of Clinical Medicine. 2013;4:8–17. DOI: 10.4236/ijcm.2013.47A1002.
3. Corrales M.A., Cronin D.S. Importance of the cervical capsular joint cartilage geometry on head and facet joint kinematics assessed in a Finite element neck model.

J Biomech. 2021;123:110528. DOI: 10.1016/j.jbiomech.2021.110528.
4. Fice J.B., Siegmund G.P., Blouin J.S. Neck muscle biomechanics and neural control. J Neurophysiol. 2018;120(1):361–371. DOI: 10.1152/jn.00512.2017.
5. Fradet L., Wang X., Lenke L.G., Aubin C.E. Biomechanical analysis of proximal junctional failure following adult spinal instrumentation using a comprehensive hybrid modeling approach. Clin Biomech (Bristol, Avon). 2016;39:122–128. DOI: 10.1016/j.clinbiomech.2016.10.008.
6. Guo R., Zhou C., Wang C., Tsai T.Y., Yu Y., Wang W. et al. In vivo primary and coupled segmental motions of the healthy female head-neck complex during dynamic head axial rotation. J Biomech. 2021;123:110513. DOI: 10.1016/j.jbiomech.2021.110513.
7. Sun M.S., Cai X.Y., Liu Q., Du C.F., Mo Z.J. Application of Simulation Methods in Cervical Spine Dynamics. J Healthc Eng. 2020;2020:7289648. DOI: 10.1155/2020/7289648.
8. Ivancic P.C. Facet joint and disc kinematics during simulated rear crashes with active injury prevention systems. Spine (Phila Pa 1976). 2011;36(18):E1215–24. DOI: 10.1097/BRS.0b013e31820545b1.
9. Karlov D., Butko D., Shajmardanova L., Borisova U., Pikalova E. The study of morbidity structure in children using automated computer technology. Journal of Global Pharma Technology. 2020;12(6):517–524.
10. Ke W., Chen C., Wang B. Hua W., Lu S., Song Y. et al. Biomechanical Evaluation of Different Surgical Approaches for the Treatment of Adjacent Segment Diseases After Primary Anterior Cervical Discectomy and Fusion: A Finite Element Analysis. Front Bioeng Biotechnol. 2021;9:718996. DOI: 10.3389/fbioe.2021.718996.
11. Kitahama Y., Ohashi H., Namba H., Sakai K., Shizuka H., Miyake H. Finite element method for nerve root decompression in minimally invasive endoscopic spinal surgery. Asian J Endosc Surg. 2021;14(3):628–635. DOI: 10.1111/ases.12879.
12. Mengoni M. Biomechanical modelling of the facet joints: a review of methods and validation processes in finite element analysis. Biomech Model Mechanobiol. 2021;20(2):389–401. DOI: 10.1007/s10237-020-01403-7.
13. Naoum S., Vasiliadis A.V., Koutserimpas C., Mylonakis N., Kotsapas M., Katakalos K. Finite Element Method for the Evaluation of the Human Spine: A Literature Overview. J Funct Biomater. 2021;12(3):43. DOI: 10.3390/jfb12030043.
14. Nishida N., Kanchiku T., Kato Y., Imajo Y., Yoshida Y., Kawano S., Taguchi T. Biomechanical analysis of cervical myelopathy due to ossification of the posterior longitudinal ligament: Effects of posterior decompression and kyphosis following decompression. Exp Ther Med. 2014;7(5):1095–1099. DOI: 10.3892/etm.2014.1557.
15. Okazaki T., Kanchiku T., Nishida N., Ichihara K., Sakuramoto I., Ohgi J. et al. Age-related changes of the spinal cord: A biomechanical study. Exp Ther Med. 2018;15(3):2824–2829. DOI: 10.3892/etm.2018.5796.
16. Whyte T., Melnyk A.D., Van Toen C., Yamamoto S., Street J., Oxland T.R., Cripton P.A. A neck compression injury criterion incorporating lateral eccentricity. Sci Rep. 2020;10(1):7114. DOI: 10.1038/s41598-020-63974-w.
17. Yakovlev E.V., Ovsepyan A.L., Smirnov A.A., Safronova A.A., Starchik D.A., Zhivolupov S.A. et al. Reproducing morphological features of intervertebral disc using finite element modeling to predict the course of cervical spine dorsopathy. Russian Open Medical Journal. 2022;11(1):118. DOI: 10.15275/rusomj.2022.0118.

## REFERENCES

1. Iskra D.A., Butko D.Yu. Uridin i uridinsoderzhashchiye kompleksy pri nespetsificheskoy boli v spine. Ot patogeneza k lecheniyu. [Uridine and uridine-containing complexes for nonspecific back pain. From pathogenesis to treatment]. Nervnyye bolezni. 2020;4:20–24. DOI: 10.24412/2226-0757-2020-12241. (in Russian).
2. Agarwal Aakash & Agarwal Anand. The Endplate Morphology Changes with Change in Biomechanical Environment Following Discectomy. Int. J. of Clinical Medicine. 2013;4:8–17. DOI: 10.4236/ijcm.2013.47A1002.
3. Corrales M.A., Cronin D.S. Importance of the cervical capsular joint cartilage geometry on head and facet joint kinematics assessed in a Finite element neck model. J Biomech. 2021;123:110528. DOI: 10.1016/j.jbiomech.2021.110528.
4. Fice J.B., Siegmund G.P., Blouin J.S. Neck muscle biomechanics and neural control. J Neurophysiol. 2018;120(1):361–371. DOI: 10.1152/jn.00512.2017.
5. Fradet L., Wang X., Lenke L.G., Aubin C.E. Biomechanical analysis of proximal junctional failure following adult spinal instrumentation using a comprehensive hybrid modeling approach. Clin Biomech (Bristol, Avon). 2016;39:122–128. DOI: 10.1016/j.clinbiomech.2016.10.008.
6. Guo R., Zhou C., Wang C., Tsai T.Y., Yu Y., Wang W. et al. In vivo primary and coupled segmental motions of the healthy female head-neck complex during dynamic head axial rotation. J Biomech. 2021;123:110513. DOI: 10.1016/j.jbiomech.2021.110513.
7. Sun M.S., Cai X.Y., Liu Q., Du C.F., Mo Z.J. Application of Simulation Methods in Cervical Spine Dynamics. J Healthc Eng. 2020;2020:7289648. DOI: 10.1155/2020/7289648.
8. Ivancic P.C. Facet joint and disc kinematics during simulated rear crashes with active injury prevention systems. Spine (Phila Pa 1976). 2011;36(18):E1215–24. DOI: 10.1097/BRS.0b013e31820545b1.
9. Karlov D., Butko D., Shajmardanova L., Borisova U., & Pikalova E. The study of morbidity structure in children using automated computer technology. Journal of Global Pharma Technology. 2020;12(6):517–524.

10. Ke W., Chen C., Wang B. Hua W., Lu S., Song Y. et al. Biomechanical Evaluation of Different Surgical Approaches for the Treatment of Adjacent Segment Diseases After Primary Anterior Cervical Discectomy and Fusion: A Finite Element Analysis. Front Bioeng Biotechnol. 2021;9:718996. DOI: 10.3389/fbioe.2021.718996.
11. Kitahama Y., Ohashi H., Namba H., Sakai K., Shizuka H., Miyake H. Finite element method for nerve root decompression in minimally invasive endoscopic spinal surgery. Asian J Endosc Surg. 2021;14(3):628–635. DOI: 10.1111/ases.12879.
12. Mengoni M. Biomechanical modelling of the facet joints: a review of methods and validation processes in finite element analysis. Biomech Model Mechanobiol. 2021;20(2):389–401. DOI: 10.1007/s10237-020-01403-7.
13. Naoum S., Vasiliadis A.V., Koutserimpas C., Mylonakis N., Kotsapas M., Katakalos K. Finite Element Method for the Evaluation of the Human Spine: A Literature Overview. J Funct Biomater. 2021;12(3):43. DOI: 10.3390/jfb12030043.
14. Nishida N., Kanchiku T., Kato Y., Imajo Y., Yoshida Y., Kawano S., Taguchi T. Biomechanical analysis of cervical myelopathy due to ossification of the posterior longitudinal ligament: Effects of posterior decompression and kyphosis following decompression. Exp Ther Med. 2014;7(5):1095–1099. DOI: 10.3892/etm.2014.1557.
15. Okazaki T., Kanchiku T., Nishida N., Ichihara K., Sakuramoto I., Ohgi J. et al. Age-related changes of the spinal cord: A biomechanical study. Exp Ther Med. 2018;15(3):2824–2829. DOI: 10.3892/etm.2018.5796.
16. Whyte T., Melnyk A.D., Van Toen C., Yamamoto S., Street J., Oxland T.R., Cripton P.A. A neck compression injury criterion incorporating lateral eccentricity. Sci Rep. 2020;10(1):7114. DOI: 10.1038/s41598-020-63974-w.
17. Yakovlev E.V., Ovsepyan A.L., Smirnov A.A., Safronova A.A., Starchik D.A., Zhivolupov S.A. et al. Reproducing morphological features of intervertebral disc using finite element modeling to predict the course of cervical spine dorsopathy. Russian Open Medical Journal. 2022;11(1):118. DOI: 10.15275/rusomj.2022.0118.