

МОХОВА Е.С.,

ФГБОУ ВО СЗГМУ им. И.И. Мечникова Минздрава России, г. Санкт-Петербург, Россия,
e-mail: mokhova-es@mail.ru

КОЛСАНОВ А.В.,

д.м.н., профессор, профессор РАН, ФГБОУ ВО «СамГМУ» Минздрава России, г. Самара, Россия,
e-mail: a.v.kolsanov@samsmu.ru

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ БИОМЕХАНИКИ ФИЗИОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ШЕЙНОГО ОТДЕЛА ПОЗВОНОЧНИКА

DOI: 10.25881/18110193_2024_1_60

Аннотация. В настоящее время математический анализ и трёхмерное моделирование являются новыми перспективными способами получения дополнительной информации, с помощью которых исследователь имеет возможность виртуально наблюдать и моделировать сложные биомеханические явления. Вопросы динамической анатомии шеи, а также биомеханических характеристик отдельных её структур составляют значительный практический и теоретический интерес для многих областей медицины.

Цель исследования: разработка виртуальной динамической модели шеи человека и на её основе воспроизведение динамических процессов с использованием метода конечных элементов.

Материалы и методы: Изучена биомеханика физиологических процессов шейного отдела позвоночника с применением МРТ. Генерация сетки конечных элементов и контактные взаимодействия выполнялись с использованием программного обеспечения HyperMesh. Конечно-элементный анализ был выполнен с использованием программного обеспечения Abaqus CAE 6.14.

Проведен ретроспективный анализ результатов 124 высококачественных МРТ исследований (40 мужчин и 84 женщины). В базу данных включены исследования, которые подходили под параметры включения и исключения. Статистическую обработку проводили с помощью программы MS Excel 2019 в надстройке «Анализ данных». Параметрические показатели проверяли на нормальное распределение в функции «описательной статистики», затем рассчитывали достоверность различия показателей с помощью двухстороннего критерия Стьюдента. Для оценки непараметрических показателей использовали χ^2 -Пирсона с построением таблиц сопряженности. Для изучения зависимости значения $tg \alpha$ от возраста пациентов при наличии или отсутствием выпячиваний МПД применили дисперсионный анализ различий в более чем двух группах с применением метода одностороннего ANOVA.

Результаты: Разработана методика создания виртуальной динамической модели шеи. Результаты конечно-элементного анализа сегмента С3-С5 при осевой нагрузке были сопоставлены с данными *in vitro*.

Заключение: Результаты моделирования с использованием предложенной методики хорошо согласуются с экспериментальными данными. Сгенерированные биомеханические модели позволяют описывать динамические явления в шейном отделе позвоночника и получать широкий спектр количественных свойств объектов.

Ключевые слова: метод конечных элементов; МКЭ; Abaqus CAE; материальная модель Хольцапфеля-Гассера-Огдена; межпозвоноковый диск; биомеханика шеи.

Для цитирования: Мохова Е.С., Колсанов А.В. Компьютерное моделирование биомеханики физиологических процессов шейного отдела позвоночника. Врач и информационные технологии. 2024; 1: 60-69.

МОХОВА Е.С.,

North-Western State Medical University named after I.I. Mechnikov, St. Petersburg, Russia,
e-mail: mokhova-es@mail.ru

КОЛСАНОВ А.В.,

DSc, Prof., Prof. of the RAS, Samara State Medical University, Samara, Russia,
e-mail: a.v.kolsanov@samsmu.ru

COMPUTER SIMULATION OF BIOMECHANICS OF PHYSIOLOGICAL PROCESSES OF THE CERVICAL SPINE

DOI: 10.25881/18110193_2024_1_60

Abstract. Currently, mathematical analysis and three-dimensional modeling represent a new promising way to obtain additional information, which allows the researcher to virtually observe and model complex biomechanical phenomena. Issues of dynamic neck anatomy, as well as the biomechanical characteristics of its individual structures, are of significant practical and theoretical interest regarding many areas of medicine.

Aim: to develop a virtual dynamic model of the human neck and in order to reproduce dynamic processes using the finite element method.

Materials and methods: Biomechanics of physiological processes of the cervical spine were studied using MRI. Finite element mesh generation and contact interactions were performed using HyperMesh software. Material modeling and finite element analysis were performed using Abaqus CAE 6.14 software.

A retrospective analysis of the results of 124 high-quality MRI studies (40 men and 84 women) was conducted. The database included studies that met the inclusion and exclusion criteria. Statistical processing was carried out using MS Excel 2019 in the "Data Analysis" add-on. Parametric indicators were checked for normal distribution in the "descriptive statistics" function, followed by calculation of the significance of the differences in indicators with a "two-tailed Student's test". To assess nonparametric indicators, χ^2 -Pearson was used to construct contingency tables. To study the dependence of the tg a value on the age of patients in the presence or absence of IVD protrusions, analysis of variance was used for differences in more than two groups using the one-way ANOVA method.

Results: A technique for creating a virtual dynamic neck model has been developed. The results of finite element analysis of the C3-C5 segment under axial loading were compared with in vitro data.

Conclusion: The simulation results gained using the proposed technique are in good agreement with experimental data. The generated biomechanical models make it possible to describe dynamic phenomena in the cervical spine and obtain a wide range of quantitative properties of objects.

Keywords: finite element method; FEM; Abaqus CAE; Holzapfel-Gasser-Ogden material model; intervertebral disc; neck biomechanics.

For citation: Mohova E.S., Kolsanov A.V. Computer simulation of biomechanics of physiological processes of the cervical spine. Medical doctor and information technology. 2024; 1: 60-69.

ВВЕДЕНИЕ

Вопросы динамической анатомии шеи, а также биомеханических характеристик отдельных её структур составляют значительный практический и теоретический интерес для многих областей медицины. Трёхмерные, параметрические, биомеханические и математические модели имеют важное самостоятельное значение, как средство детального и всестороннего изучения объекта исследования [1, 2]. Изучение биомеханического компонента также имеет значение и в клинической практике [3–5]. Шея человека является, пожалуй, наиболее сложной для детального описания с точки зрения биомеханики областью человеческого тела. Взаимодействие окружающей среды с генетическими факторами ускоряет процесс дегенерации межпозвоночных дисков (МПД) [6]. Для выработки рациональных лечебно-диагностических стратегий в каждом конкретном случае необходимо понимание основных причинных факторов повреждения МПД, обуславливающих формирование грыжевых выпячиваний МПД [7].

Целью данного исследования стала разработка виртуальной динамической модели шеи человека и на её основе воспроизведение динамических процессов с использованием метода конечных элементов.

Исходя из цели нашего исследования сформировано 2 этапа изучения систем биомеханического анализа:

1. Изучение биомеханики физиологических процессов шейного отдела позвоночника.
2. Построение конечно-элементных моделей с целью реконструкции и анализа биомеханических механизмов шейного отдела позвоночника.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Методология исследования и основные этапы

В основе методологии исследования лежит математический анализ трёхмерных объектов, полученных при топографо-анатомических исследованиях или при постановке условий биомеханической задачи. Конечным результатом каждой части исследования являлось создание биотехнической системы, способной решать конкретные клинические задачи (диагностика, прогноз течения и планирование лечения).

В этом исследовании мы использовали данные МРТ для получения первичных трёхмерных данных с целью последующего создания статических и динамических анатомических моделей.

Создание сетки конечных элементов и контакт взаимодействий были выполнены с использованием программного обеспечения HyperMesh. Анизотропная гиперупругая модель Хольцапфеля-Гассера-Огдена была использована для описания поведения материала фиброзных колец диска. Моделирование материалов и конечно-элементный проводился с использованием программного обеспечения Abaqus CAE 6.14.

Объектом исследования явилась случайная выборка, собранная сплошным методом, состоящая из 124 исследований МРТ шейного отдела различных пациентов, из которых было 40 мужчин в возрасте от 21 до 65 лет (средний $47,8 \pm 2,00$ лет), 84 женщины – от 25 до 83 лет (средний $52,8 \pm 1,50$ года). Достоверных различий среднего возраста между мужчинами и женщинами не выявлено ($t = 0,51$, $p = 0,612$).

Два сегмента шейного отдела позвоночника C3-C5, были отдельно выделены из полученной модели для конечно-элементного анализа. Генерация сетки конечных элементов и контактные взаимодействия выполнялись с использованием программного обеспечения HyperMesh.

При формировании группы для изучения биомеханики шейного отдела позвоночника учитывались критерии включения и исключения.

Критерии включения: пациенты, которым была выполнена МРТ области шеи; возраст обследуемых – 20–90 лет; отсутствие патологий в области шеи; высокое качество результатов МРТ для построения трёхмерной модели сосудов.

Критерии исключения: отказались от участия; не соответствуют критериям включения.

Интересующие нас параметры на МРТ были проверены высококвалифицированным врачом-рентгенологом с 10-летним стажем. Далее нами проведена статистическая обработка данных с помощью программы MS Excel 2019 в надстройке «Анализ данных». Параметрические (количественные) данные оценивались на нормальное распределение и рассчитывались показатели описательной статистики, затем определяли достоверность различия показателей

с помощью двухстороннего критерия Стьюдента. Для оценки непараметрических показателей использовали χ^2 -Пирсона. Для изучения зависимости значения $\text{tg } \alpha$ от возраста пациентов при наличии или отсутствии выпячиваний МПД применяли дисперсионный анализ различий в более чем двух группах с применением метода одностороннего ANOVA.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В биологии при изучении биомеханики физиологических процессов в организме часто используются технологии *in vivo* (в живом организме) и *in vitro* (в пробирке). В настоящее время на первое место выходит новая технология *in silico* (компьютерное моделирование (симуляция) эксперимента), которая позволяет без вреда для здоровья пациента провести моделирование сложных диагностических манипуляций.

1. Биомеханика физиологических процессов шейного отдела позвоночника

В начале исследования изучали влияние биомеханических факторов на процесс формирования смещений дискового материала (выпячивания) за пределы пространства МПД шейного отдела позвоночника. При рассмотрении

механических факторов, нами изучались особенности трёхмерной структуры позвонка, определяли соотношения длин плеч рычагов и векторы направления силы, действующие в каждом отдельном позвоночно-двигательном сегменте (ПДС). В основу нашего анализа взят способ оценки риска возникновения грыжевых выпячиваний МПД С4-С5, С5-С6 и С6-С7 шейного отдела позвоночника путем МРТ-исследования, описанный в патенте Яковлева Е.В. с соавторами [7] и получивший дальнейшее развитие в совместной работе [8]. Каждый ПДС в сагиттальной плоскости в стабильных условиях представляет собой систему уравновешенных рычагов с точкой опоры на уровне суставов (рисунок 1, где сплошные стрелки – направление движения при сгибании; пунктирные – при разгибании позвоночника).

При изучении изолированных биомеханических факторов на первый план выходит трёхмерная структура позвонка, которая определяет длины рычагов и векторы направления силы (рисунки 2 и 3). На рисунке 2 представлена схема фронтального среза, проходящего через центры межпозвоноковых суставов и центр пульпозного ядра типичного шейного позвонка (С4-С5, С5-С6, С6-С7).

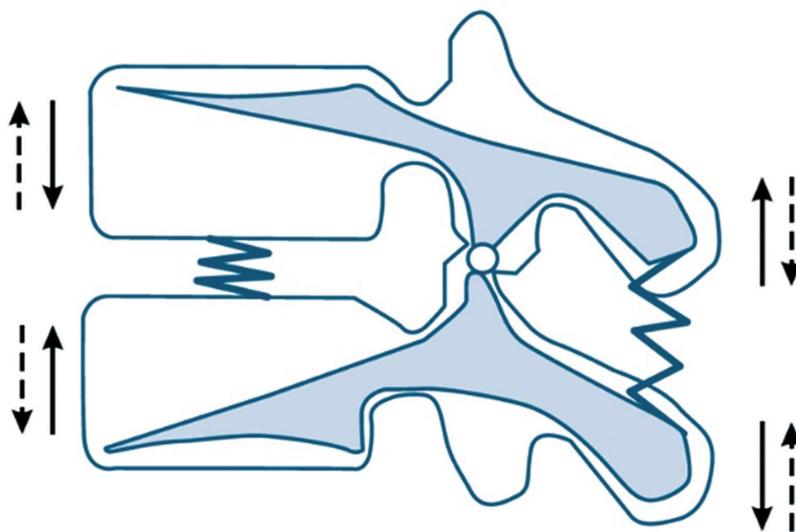


Рисунок 1 — Движения в ПДС и работа связочного аппарата позвоночника в сагиттальной плоскости [9].

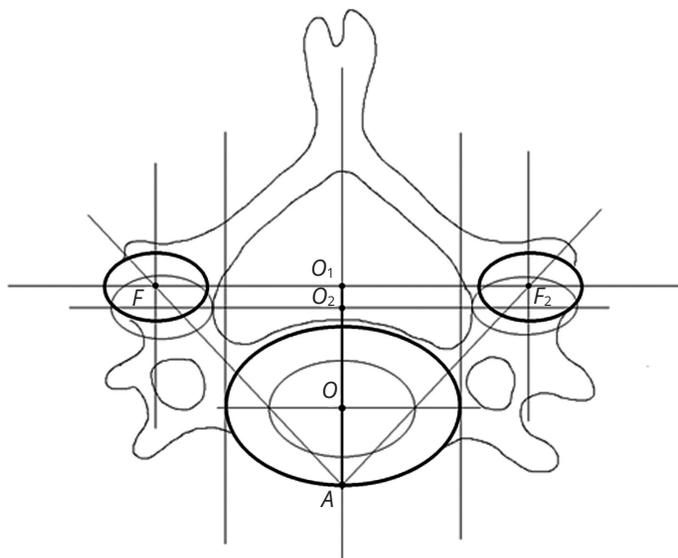


Рисунок 2 — Схема формирования рычагов силы в ПДС шейного отдела при сгибании шеи в зависимости от анатомических особенностей позвонков С4-С7 во фронтальной плоскости (расположение суставных отростков относительно диска и ширина диска) [10].

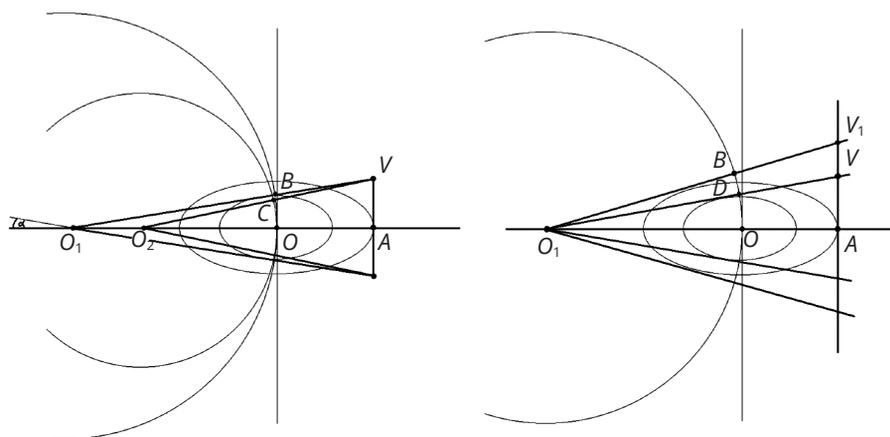


Рисунок 3 — Схема формирования рычагов силы в ПДС шейного отдела (С4-С5, С5-С6, С6-С7) при сгибании шеи в зависимости от анатомических особенностей позвонков С4-С7 (расположение суставных отростков относительно диска и ширина диска) – упрощенное изображение сагиттального среза ПДС.

На рисунке 3 представлена схема формирования рычагов силы в ПДС шейного отдела (С4-С5, С5-С6, С6-С7) и их влияние на изменение соотношения длин плеч рычага II рода O_1V .

Подробно разбор механизма формирования рычагов представлен авторами статьи в соавторстве, опубликованном ранее [8]. Используемая нами модель корректно описывает

механические особенности соединения позвонков, так как учитывает наиболее значимые особенности их строения, оказывающие влияние на изменение длин плеч рычагов и силу давления на центр МПД.

Авторы статьи, используя выявленные закономерности, создали программу для биомеханической оценки риска возникновения парамедианных выпячиваний межпозвонковых дисков на основе данных МРТ «ALPHATANG 1.0» и получили свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ [11]. Способ оценки риска выпячивания МПД в компьютерной программе для ЭВМ, созданной в соавторстве, позволяет определить степень функциональных нарушений в шейном отделе.

По данным МРТ определяли значение O_1A в горизонтальной проекции, а также значение AV , равное $\frac{1}{2}$ высоты МПД. Главным критерием оценки эффективности рычага ПДС стал угол $\alpha = AV/(O_1A)$.

Был проведен анализ изменения трёхмерных данных МРТ с целью последующего создания статических и динамических анатомических моделей.

1. Возрастная характеристика групп с наличием и отсутствием выпячиваний МПД в шейных сегментах.

В группе с выпячиванием МПД более 2,0 мм средний возраст без учета пола составил $53,4 \pm 1,24$ года, а в группе без

грыжи – $39,3 \pm 2,61$ лет, и выявлена статистическая достоверность различий между группами ($t = 4,91$, $p < 0,001$). Следует также обратить внимание, что среди мужчин старше 63 лет и женщин старше 62 лет не было ни одного пациента без выпячивания МПД. Этот факт подчеркивает актуальность темы исследования. При сравнении по среднему возрасту в группе с грыжевыми выпячиваниями между мужчинами и женщинами обнаружено более раннее возникновение изменений у мужчин на 5,3 года ($49,8 \pm 2,00$ лет и $55,1 \pm 1,54$ лет у мужчин и женщин, соответственно, статистически недостоверно, $t = 0,52$, $p = 0,606$).

2. Зависимость значений $\text{tg } \alpha$ от возраста пациентов в группах наличия или отсутствия выпячиваний МПД в трех сегментах.

На рисунке 4 представлены результаты изучения зависимости значения $\text{tg } \alpha$ от возраста пациентов в группах с наличием или отсутствием выпячиваний в сегментах. Красный цвет на рисунке обозначает группу с наличием выпячивания, синий – отсутствием.

В целом, можно наблюдать, что для сегмента С6-С7 явно выражена тенденция к снижению тангенса с увеличением возраста (отрицательная связь), причем для пациентов с наличием выпячивания эта тенденция больше, чем для пациентов без выпячивания. Для сегментов С4-С5, С5-С6 тенденция прослеживается менее выражено.

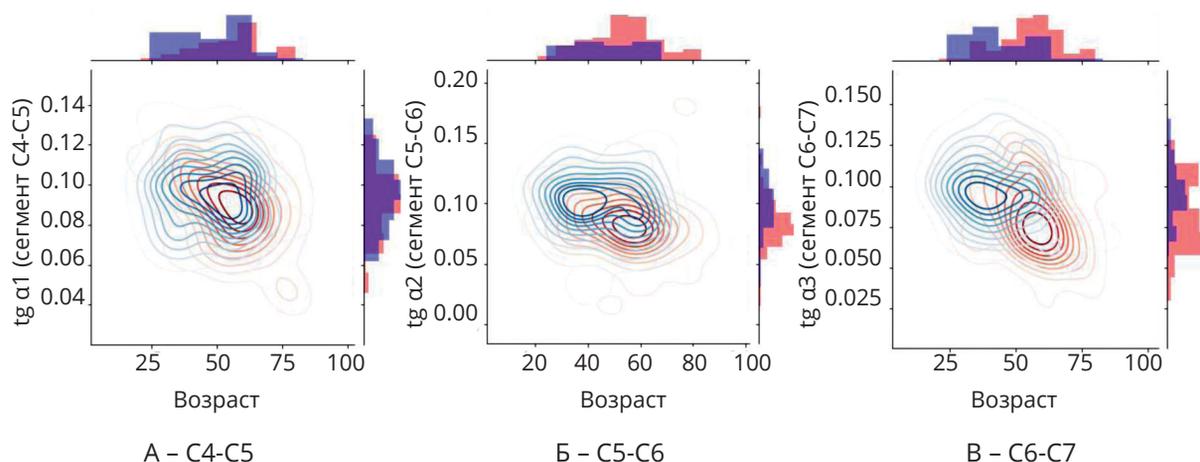


Рисунок 4 — Зависимость значения $\text{tg } \alpha$ от возраста пациентов в группах с наличием или отсутствием выпячиваний в сегментах.

2. Построение конечно-элементных моделей с целью реконструкции и анализа биомеханики шейного отдела позвоночника

В этом разделе представлены результаты биомеханического анализа шейного сегмента позвоночника при совместной работе авторов статьи с коллективом исследователей различных специальностей, опубликованные в журнале *Annals of Anatomy – Anatomischer Anzeiger* [1], где подробно описаны этапы построения фасциальных слоёв антропоморфной конечно-элементной модели шеи. Далее демонстрируем итоги совместной работы [1].

Виртуальная конечно-элементная модель шеи.

Была произведена сегментация более чем 80 основных структур шеи на основе данных КТ-исследований пациентов. Для каждой анатомической структуры была создана модель NURBS. Была проведена валидация созданной модели, то есть определение адекватности поведения и сопоставимости результатов моделирования с поведением реальных биологических объектов. Распределение напряжения при сжатии имеет сильно нелинейный характер даже при малых нагрузках. Наклон кривых нагрузки-смещения изменяется во всем диапазоне движения позвоночника, но становится приблизительно линейным при более высоких нагрузках.

ОБСУЖДЕНИЕ

1. Биомеханика физиологических процессов шейного отдела позвоночника

Исследование позволило изучить влияние биомеханических факторов на процесс формирования смещений дискового материала (выпячивания) за пределы пространства МПД шейного отдела позвоночника. В повседневной практике дегенеративные изменения МПД оцениваются двумерными геометрическими и сигнальными характеристиками. При изучении изолированных биомеханических факторов в перспективе на первый план выходит изучение трехмерной структуры позвонка, так как именно она определяет длины рычагов и векторы направления силы. По данным многочисленным исследований [12, 13] высота диска на срединно-сагиттальной МРТ не является надежным признаком определения возрастной дегенерации

диска, что доказывает актуальность нашего исследования.

Полученные данные явно свидетельствуют о том, что эффективность рычага ПДС С5-С6 и С6-С7 оказывает большее влияние на процесс формирования выпячиваний МПД в молодом возрасте, в то время как в пожилом возрасте формирование выпячиваний может происходить и при меньших значениях tga .

2. Построение конечно-элементных моделей с целью реконструкции и анализа биомеханических механизмов шейного отдела позвоночника

До настоящего времени были предприняты отдельные попытки описания закономерностей смещения органов и мышечно-фасциальных слоёв шеи. Однако единой системы описания этих изменений, равно как и механизмов последних, никто из исследователей так и не смог сформулировать, что связано со сложностью описания нелинейных закономерностей смещения фасциальных слоёв шеи, которые можно объяснить различием верхних и нижних точек фиксации миофасциальных образований, а также различием физических характеристик смещаемых объектов.

Полученные данные явно свидетельствуют о том, что эффективность рычага ПДС С5-С6 и С6-С7 оказывает большее влияние на процесс формирования выпячиваний МПД в молодом возрасте, в то время как в пожилом возрасте формирование выпячиваний может происходить и при меньших значениях tga .

Наклон кривых нагрузки-смещения изменяется во всем диапазоне движения позвоночника, но становится приблизительно линейным при более высоких нагрузках. Значения смещения приведены для геометрического центра тела позвонка С4. Спрогнозированные нами данные были сопоставлены с соответствующими экспериментальными данными из литературы (рисунок 5) [1, 14, 15].

Подводя итог, можно утверждать, что несмотря на необходимость дальнейшего совершенствования моделирования МПД, результаты моделирования с использованием предложенных в нашем исследовании методов хорошо согласуются с известными экспериментальными данными.

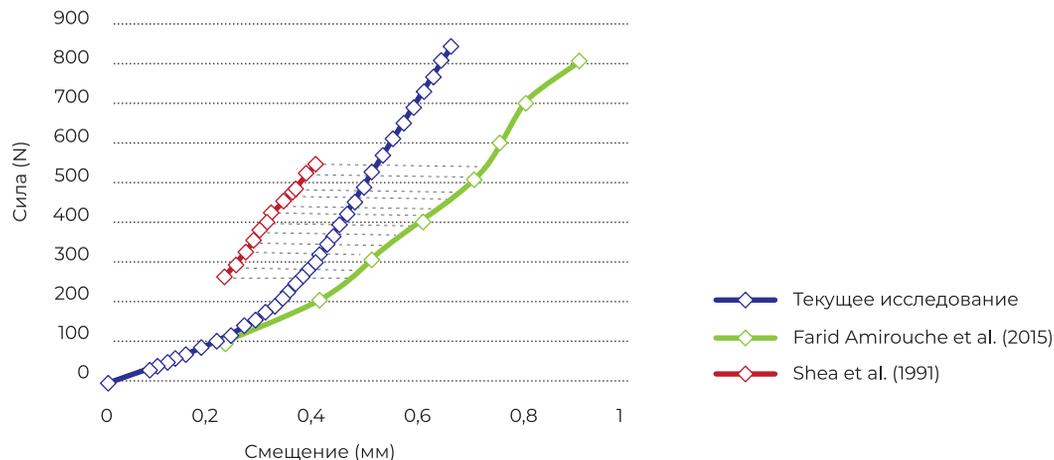


Рисунок 5. Сравнение кривых нагрузки-смещения между предложенной компьютерной моделью и экспериментальными данными из литературы [1, 14, 15].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Биомеханические модели позволяют описать динамические явления в шейном отделе позвоночника и получить широкий спектр количественных свойств анатомических объектов, недоступных классическим методам изучения динамической и функциональной анатомии. Сложная технология построения визуальных образов и отсутствие врачей-кибернетиков, владеющих этой методикой, задерживает внедрение и повышает стоимость диагностической услуги. Подключение технологий искусственного

интеллекта даёт надежду на ускорение этого процесса.

Данная методика представляет практически безграничные возможности в области моделирования различных типов патологий и создания трёхмерного визуального контента для моделирования различных лечебно-диагностических манипуляций, а также при создании и применении технологий дополненной реальности [16–18].

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ЛИТЕРАТУРА/REFERENCES

1. Ovsepyan AL, Smirnov AA, Pustozherov EA, Mokhov DE, Mokhova ES, Trunin EM, Dydykin SS, Vasil'ev YuL, Yakovlev EV, Budday S, Paulsen F, Zhivolupov SA, Starchik DA, Biomechanical analysis of the cervical spine segment as a method for studying the functional and dynamic anatomy of the human neck. *Annals of Anatomy – Anatomischer Anzeiger*. 2022; 240: 151856. doi: 10.1016/j.aanat.2021.151856.
2. Смирнов А.А., Овсепьян А.Л., Квиндт П.А. и др. Конечно-элементный анализ при моделировании структур сердца и аорты // Альманах клинической медицины. – 2021. – №49(6). – С.375-384. [Smirnov AA, Ovsepyan AL, Quindt PA, et al. Finite element analysis for modeling the structures of the heart and aorta. *Almanac of Clinical Medicine*. 2021; 49(6): 375-384. (In Russ.)] doi: 10.18786/2072-0505-2021-49-043.
3. Мохов Д.Е., Беляев А.Ф., Азаренков М.Д. и др. Остеопатическая диагностика соматических дисфункций в педиатрии: клинические рекомендации. СПб.: Невский ракурс, 2015. – 60 с. [Mokhov DE, Belyaev AF, Azarenkov MD, et al. *Osteopathic diagnosis of somatic dysfunctions. Clinical recommendations*. St Petersburg: Nevskiy rakurs, 2015. 60 p. (In Russ.)]

4. Liem TA. T. Still's Osteopathic Lesion Theory and Evidence-Based Models Supporting the Emerged Concept of Somatic Dysfunction. *J Am Osteopath Assoc.* 2016; 116(10): 654-661. doi: 10.7556/jaoa.2016.129.
5. Wagner F.M. Somatic dysfunction of the cervical spine and its complex clinical picture: The fundamentals of diagnostics of cervicobrachialgia and cervicocephalic syndrome through manual medicine. *Orthopade.* 2022; 51(4): 263-273. doi: 10.1007/s00132-022-04227-8.
6. Мохова Е.С., Мохов Д.Е., Яковлев Е.В. и др. Топографо-анатомический анализ и конечно-элементное моделирование динамических и биомеханических закономерностей смещения мышечно-фасциальных футляров шеи // Медицинский совет. – 2023. – Т.17. – №6. – С.330-344. [Mokhova ES, Mokhov DE, Yakovlev EV, et al. Topographic-anatomical analysis and finite element modeling of dynamic and biomechanical patterns of displacement of the muscular-fascial sheaths of the neck. *Medical Council.* 2023; 17(6): 330-344. (In Russ.)] doi: 10.21518/ms2023-061.
7. Патент РФ №2795175 С1. Способ оценки риска возникновения грыжевых выпячиваний межпозвоноковых дисков C4-C5, C5-C6 и C6-C7 шейного отдела позвоночника: №2022118552: заявл. 06.07.2022: опубл. 28.04.2023 / Е.В. Яковлев, А.А. Смирнов, С.А. Живолупов и др. [Patent RF №2795175 С1. Method for assessing the risk of hernial protrusions of intervertebral discs C4-C5, C5-C6 and C6-C7 of the cervical spine: №2022118552: application. 07/06/2022: publ. 04/28/2023 / E.V. Yakovlev, A.A. Smirnov, S.A. Zhivolupov, et al.
8. Яковлев Е.В., Смирнов А.А., Живолупов С.А. и др. Анатомическая оценка изолированного влияния биомеханических факторов на процесс формирования смещений дискового материала за пределы пространства межпозвоноковых дисков шейного отдела позвоночника в структуре дорсопатий // Оперативная хирургия и клиническая анатомия. – 2022. – №6(2). – С.32-44. [Yakovlev EV, Smirnov AA, Zhivolupov SA, et al. Anatomical assessment of the isolated influence of biomechanical factors on the process of formation of displacements of disc material outside the space of the intervertebral discs of the cervical spine in the structure of dorsopathies. *Operative surgery and clinical anatomy.* 2022; 6(2): 32-44. (In Russ.)] doi: 10.17116/operhirurg2022602132.
9. Suzuki A, Daubs MD, Hayashi T, et al. Magnetic Resonance Classification System of Cervical Intervertebral Disk Degeneration: Its Validity and Meaning. *Clin Spine Surg.* 2017; 30(5): 547-553. doi: 10.1097/bsd.000000000000172.
10. 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; 27(5): 1073-1081. doi: 10.1007/s00586-017-5357-3.
11. Кузьмин А.И., Кон И.И., Беленький В.Е. Сколиоз, М., 1981. [Kuzmin AI, Kon II, Belenkiy VE. Scoliosis, M., 1981. (In Russ.)]

12. Старчик Д.А., Акопов А.Л. Атлас распилов человеческого тела: Учебное пособие. – СПб.: ММЦ, 2020. – 172 с. [Starchik DA, Akopov AL. Atlas of cuts of the human body: Textbook. St. Petersburg: MMC, 2020. (In Russ.)]
13. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2024611176 РФ. Программа для биомеханической оценки риска возникновения парамедианных выпячиваний межпозвоночных дисков на основе данных МРТ «ALPHATANG 1.0»: №2023689232. заявл. 25.12.2023. опублик. 18.01.2024. А.А. Смирнов, Е.С. Мохова, А.В. Колсанов и др. [Certificate of state registration of a computer program №2024611176 RF. Program for biomechanical assessment of the risk of paramedian protrusions of intervertebral discs based on MRI data «ALPHATANG 1.0»: №2023689232: application. 12/25/2023. publ. 01/18/2024. A.A. Smirnov, E.S. Mokhova, A.V. Kolsanov et al. (In Russ.)]
14. Shea M, et al. Variations of stiffness and strength along the human cervical spine. *Journal of biomechanics*. 1991; 24(2): 95-107.
15. Amirouche F, et al. Role of posterior elements in the disc bulging of a degenerated cervical spine. *International journal of spine surgery*. 2015; 9.
16. Колсанов А.В., Зельтер П.М., Хобта Р.В. и др. Первые результаты применения интраоперационной навигации на основе данных КТ и МРТ у пациента с опухолью межжелудочковой перегородки // Российский электронный журнал лучевой диагностики. – 2020. – Т.10. – №4. – С.271-276. [Kolsanov AV, Zelter PM, Khobta RV, et al. First results of the use of intraoperative navigation based on CT and MRI data in a patient with a tumor of the interventricular septum. *Russian electronic journal of radiology*. 2020; 10(4): 271-276. (In Russ.)] doi: 10.21569/2222-7415-2020-10-4-271-276.
17. Колсанов А.В., Линева О.И., Иванова В.Д. Разработка и внедрение российских симуляционных и виртуальных технологий в современный образовательный процесс // Акушерство и гинекология. – 2016. – №7. – С.83-87. [Kolsanov AV, Lineva OI, Ivanova VD. Development and implementation of Russian simulation and virtual technologies in the modern educational process. *Obstetrics and gynecology*. 2016; 7: 83-87. (In Russ.)] doi: 10.18565/aig.2016.7.83-87.
18. Колсанов А.В., Манукян А.А., Зельтер П.М., Чаплыгин С.С., Капишников А.В. Виртуальное моделирование операции на печени на основе данных компьютерной томографии // Анналы хирургической гепатологии. – 2016. – №21(4). – С.16-22. [Kolsanov A.V., Manukyan A.A., Zelter P.M., Chaplygin S.S., Kapishnikov A.V. Virtual simulation of liver surgery based on computed tomography data. *Annals of surgical hepatology*. 2016; 21(4): 16-22. (In Russ.)] doi: 10.16931/1995-5464.2016416-22.