

Топографо-анатомический анализ и конечно-элементное моделирование динамических и биомеханических закономерностей смещения мышечно-фасциальных футляров шеи

Е.С. Мохова¹, Д.Е. Мохов², Е.В. Яковлев^{3,4✉}, vmeda-ev@mail.ru, С.А. Живолупов⁵, Д.Ю. Бутко³, Р.В. Алиев⁶, И.М. Гасанбеков⁷, А.С. Ведяшкина², А.А. Смирнов¹

¹ Санкт-Петербургский государственный университет; 199034, Россия, Санкт-Петербург, Университетская наб., д. 7/9

² Северо-Западный государственный медицинский университет имени И.И. Мечникова; 191015, Россия, Санкт-Петербург, ул. Кирочная, д. 41

³ Санкт-Петербургский государственный педиатрический медицинский университет; 194100, Россия, Санкт-Петербург, ул. Литовская, д. 2

⁴ Медицинский центр «Адмиралтейские верфи»; 190121, Россия, Санкт-Петербург, ул. Садовая, д. 126

⁵ Военно-медицинская академия имени С.М. Кирова; 194044, Россия, Санкт-Петербург, ул. Академика Лебедева, д. 6

⁶ Детский научно-клинический центр инфекционных болезней Федерального медико-биологического агентства; 197022, Россия, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, д. 9

⁷ Российский национальный исследовательский медицинский университет имени Н.И. Пирогова; 117997, Россия, Москва, ул. Островитянова, д. 1

Резюме

Введение. Вопросы динамической анатомии шеи представляют значительный практический и теоретический интерес. Это связано с особенностями смещения фасциальных слоев при изменении положения головы, описание которых затруднено. Особое значение изучение динамических явлений данной области имеет при анализе морфологических и биомеханических изменений, приводящих к развитию соматической дисфункции.

Цель. На основании топографо-анатомических исследований, а также с помощью конечно-элементного моделирования изучить закономерности смещения фасциальных слоев шеи при поворотах головы на 20° и 50°.

Материалы и методы. При топографо-анатомическом исследовании использованы 18 МРТ-исследований, анализ которых проводили с применением Vidar Dicom Viewer. Для построения конечно-элементной модели использованы данные КТ-исследования пациента без патологических изменений шеи. При последующей обработке данных была построена антропоморфная конечно-элементная модель области шеи и выполнена серия виртуальных топографо-анатомических исследований.

Результаты. 1. Величины вращательного и углового смещения всех фасций шеи имеют нелинейный характер. 2. Фасции неравномерно смещаются вследствие различия значений углового смещения. 3. Величина углового смещения 2-й фасции на уровне С2-С3, С3-С4 и С4-С5 при повороте головы на 20°, а также на уровне С4-С5 при повороте головы на 50° превышает значение угла поворота головы. 4. Направление вращательного и углового смещения всех фасций на уровне С6-С7 соответствует направлению поворота головы, за исключением дорзальной части 4-й фасции шеи, которая на данном уровне смещается в противоположном относительно оси симметрии направлении. 5. Для фасций, расположенных дальше от центра межпозвонкового диска, характерны большие величины углового и вращательного смещения. 6. Скорость изменения отношения вращательного и углового смещений выше на уровне нижних сегментов. 7. Результаты измерений вращательного смещения фасций конечно-элементной модели демонстрируют положительную корреляцию с полученными данными.

Выводы. Закономерности смещения фасций шеи необходимо учитывать при моделировании соматической дисфункции, в процессе диагностики и планирования остеопатических воздействий.

Ключевые слова: динамическая анатомия шеи, конечно-элементный анализ, биомеханика шеи, соматическая дисфункция, смещение фасциальных слоев

Для цитирования: Мохова Е.С., Мохов Д.Е., Яковлев Е.В., Живолупов С.А., Бутко Д.Ю., Алиев Р.В., Гасанбеков И.М., Ведяшкина А.С., Смирнов А.А. Топографо-анатомический анализ и конечно-элементное моделирование динамических и биомеханических закономерностей смещения мышечно-фасциальных футляров шеи. *Медицинский совет*. 2023;17(6):330–344. <https://doi.org/10.21518/ms2023-061>.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Topographic and anatomical analysis and finite element modeling of dynamic and biomechanical displacement patterns of the muscular-fascial cases of the neck

Ekaterina S. Mohova¹, Dmitriy E. Mohov², Evgeny V. Yakovlev^{3,4✉}, vmeda-ev@mail.ru, Sergey A. Zhivolupov⁵, Dmitriy Y. Butko³, Ramiz V. Aliev⁶, Imamudin M. Gasanbekov⁷, Alexandra S. Vedyashkina², Alexander A. Smirnov¹

¹ St Petersburg State University; 7–9, Universitetskaya Emb., St Petersburg, 199034, Russia

² North-Western State Medical University named after I.I. Mechnikov; 41, Kirochnaya St., St Petersburg, 191015, Russia

³ St Petersburg State Pediatric Medical University; 2, Litovskaya St., St Petersburg, 194100, Russia

⁴ Admiralty Shipyards Medical Center; 126, Sadovaya St., St Petersburg, 190121, Russia

⁵ Military Medical Academy named after S.M. Kirov; 6, Akademik Lebedev St., St Petersburg, 194044, Russia

⁶ Children's Scientific and Clinical Center of Infectious Diseases of the Federal Medical and Biological Agency; 9, Professor Popov St., St Petersburg, 197022, Russia

⁷ Pirogov Russian National Research Medical University; 1, Ostrovityanov St., Moscow, 117997, Russia

Abstract

Introduction. The issues of dynamic and functional anatomy of the neck are of considerable practical and theoretical interest. This is due to the peculiarities of the displacement of the musculofascial layers when changing the position of the head in space, the description of which presents significant difficulties. Particular practical importance has therefore the study of dynamic phenomena of this area as well as the analysis of morphological and biomechanical changes leading to the development of somatic dysfunction of the neck.

Aim. Based on the topographic and anatomical studies, as well as with the help of finite element modeling, to study the patterns of displacement of the muscular-fascial layers of the neck when turning the head by 20° and 50°.

Materials and methods. The topographic and anatomical study used the results of 18 MRIs, the analysis of which was carried out using the Vidar Dicom Viewer software. To build a finite element model, data from a CT study of a patient were used, which has not any pathological changes in the organs and musculoskeletal system of the neck. As a result of the subsequent processing of the CT study data, a personalized anthropomorphic finite element model of the neck region was constructed, with the help of which a series of virtual topographic and anatomical studies were performed, repeating in general terms the topographic and anatomical part of the work.

Results. 1. The values of rotational and angular displacement of all fascia of the neck are nonlinear. 2. The fascia of the neck are displaced relative to each other when turning the head due to the difference in the values of angular displacement. 3. The magnitude of the angular displacement of the 2nd fascia of the neck at the level C2-C3, C3-C4 and C4-C5 when turning the head 20°, as well as at the level C4-C5 when turning the head 50° exceeds the value of the angle of rotation of the head relative to the trunk. 4. The direction of rotational and angular displacement for all fasciae at the level C6-C7 corresponds to the direction of rotation of the head, with the exception of the dorsal part of the 4th fascia of the neck, which at this level, together with the esophagus, shifts in the opposite direction relative to the axis of symmetry. 5. Fasciae located at a greater distance from the center of the intervertebral disc are characterized by large values of angular and rotational displacement. 6. The rate of change in the ratio of rotational and angular displacements is higher at the level of the lower segments. 7. The results of measurements of the rotational displacement of the fascial layers of the anthropomorphic finite element model demonstrate a positive correlation with the data of the topographic and anatomical study.

Conclusion. The patterns of displacement of the neck musculofacial layers should be taken into account when modeling somatic dysfunction of the neck, as well as in the process of diagnosis and planning of osteopathic effects.

Keywords: dynamic neck anatomy, finite element analysis, neck biomechanics, somatic dysfunction, displacement of fascial layers

For citation: Mohova E.S., Mohov D.E., Yakovlev E.V., Zhivolupov S.A., Butko D.Y., Aliev R.V., Gasanbekov I.M., Vedyashkina A.S., Smirnov A.A. Topographic and anatomical analysis and finite element modeling of dynamic and biomechanical displacement patterns of the muscular-fascial cases of the neck. *MeditSinskiy Sovet.* 2023;17(6):330–344. (In Russ.) <https://doi.org/10.21518/ms2023-061>.

Conflict of interest: the authors declare no conflict of interest.

ВВЕДЕНИЕ

Соматическая дисфункция представляет собой функциональное нарушение, проявляющееся биомеханическим, ритмогенным и нейродинамическим компонентами [1–7]. Ключевое значение в формировании соматической дисфункции играет именно биомеханический компонент, главные причины возникновения которого заключаются в реализации имеющихся или в возникновении новых морфологических изменений. Шея человека является, пожалуй, наиболее сложной для описания с точки зрения биомеханики областью человеческого тела. В то же время именно в области шеи возможно возникновение большого количества различных морфологических предпосылок для формирования стойкой соматической дисфункции, а в дальнейшем и патологии.

Пациенты, страдающие сегментарной и соматической дисфункцией шейного отдела позвоночника, часто проявляют широкий спектр клинических симптомов, связанных с шейно-плечевым или цервикоцефальным синдромом. Эти симптомы могут развиваться в результате сложных нейронных межсегментарных или тригеминоцервикальных взаимодействий в стволе головного мозга или спинном мозге шейного отдела позвоночника [4].

Динамическая и функциональная анатомия – это область анатомии, которая рассматривает топографические, стереометрические и функциональные взаимодействия анатомических объектов в различных физиологических движениях и процессах. Вопросы динамической анатомии шеи, а также биомеханических характеристик отдельных ее структур составляют значительный практический и теоретический интерес для многих областей

медицины. Это связано как с особенностью ее расположения, так и с особенностями взаимного смещения мышечно-фасциальных слоев при изменении положения головы в пространстве: поворотах, наклонах и различных комбинациях этих движений. Вышеуказанные смещения носят нелинейный характер, что значительно затрудняет их описание и интерпретацию [8].

Особое практическое значение изучения динамических явлений данной области имеет при анализе морфологических и биомеханических изменений, приводящих к развитию соматической дисфункции области шеи, а также с целью изучения механизмов остеопатических воздействий.

Краткая историческая справка. Традиционно динамическая и функциональная анатомия, в частности динамическая анатомия шеи, изучается *in vitro* на трупном материале [9–12]. Этот метод, несомненно, является золотым стандартом в описании динамических событий анатомических структур, однако в дальнейшем развитие технологий визуализации *in vivo*, аддитивного производства и моделирования *in silico* позволило расширить возможности изучения динамической анатомии шеи.

Первая детально описанная попытка анализа смещения мышечно-фасциальных структур шеи при изменении положения головы в пространстве была предпринята еще во второй половине XV в. итальянским художником, анатомом и изобретателем Леонардо да Винчи (рис. 1) [11].

Великий хирург и анатом Николай Иванович Пирогов также занимался вопросами динамической анатомии шеи. Результаты этой работы нашли свое отражение на страницах известного труда «Иллюстрированная топографическая анатомия распилов, проведенных в трех измерениях через замороженное человеческое тело» (рис. 2) [12].

Попытка по-настоящему глубокого, детального и всестороннего осмысления динамической анатомии шеи также принадлежит нашему соотечественнику – хирургу и анатому Сергею Николаевичу Делицину, который в 1889 г. в своем труде «К вопросу о смещении органов шеи при некоторых движениях головы» обобщил имеющиеся данные о смещении органов шеи при поворотах и наклонах головы, а также привел данные собственного исследования этого вопроса¹ (рис. 3).

Современное состояние проблемы. К настоящему времени опубликовано лишь несколько работ, посвященных виртуальному конечно-элементному моделированию биомеханических особенностей взаимодействия отдельных структур шеи человека. Данные работы не рассматривают при этом биомеханику шеи в целом, фокусируясь лишь на решении конкретных практических задач. Так, например, были предложены крупномасштабные динамические модели головы и шеи [13, 14], сгенерированные на основе данных компьютерной, магнитно-резонансной томографии и лазерного сканирования. Авторы сделали вывод о том, что на основе этих моделей можно интерактивно исследовать анатомические структуры шеи и моделировать сценарии инъекций, операции на нижней челю-

сти и др. Более того, была продемонстрирована возможность использования нежесткой аддитивной печати анатомических структур в процессе обучения студентов [15].

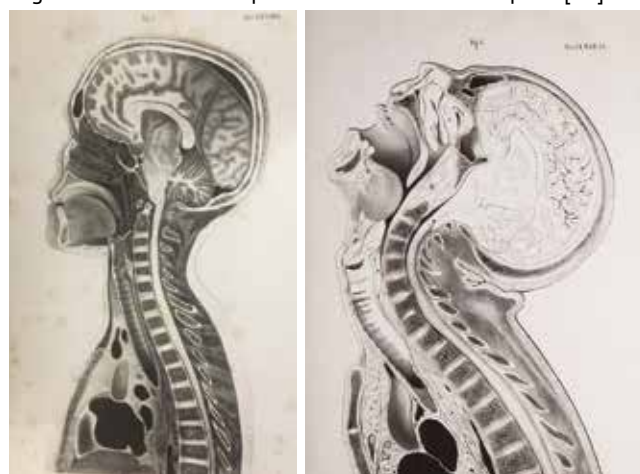
Было обнаружено, что нежесткие модели точно воспроизводят изменения *in vivo*, зарегистрированные с помощью функциональной компьютерной томографии. Наконец, в качестве метода предоперационного планирования также была предложена аддитивная печать персонализированных сегментов шейного отдела позвоночника [16].

Тайваньские ученые Ю. Цанг и соавт. применили методу конечно-элементного анализа для изучения влияния различных высот трансплантата межпозвонкового диска на соседний сегмент и напряжение сегмента трансплантата после передней цервикальной дискэктомии C4-C5 и спондилодеза. Авторами была построена детальная,



Рисунок 2. Анатомические иллюстрации сагиттальных распилов замороженного тела человека при различных положениях головы в пространстве [12]

Figure 2. Anatomical illustrations of a frozen human body sagittal cut at different positions of the head in space [12]



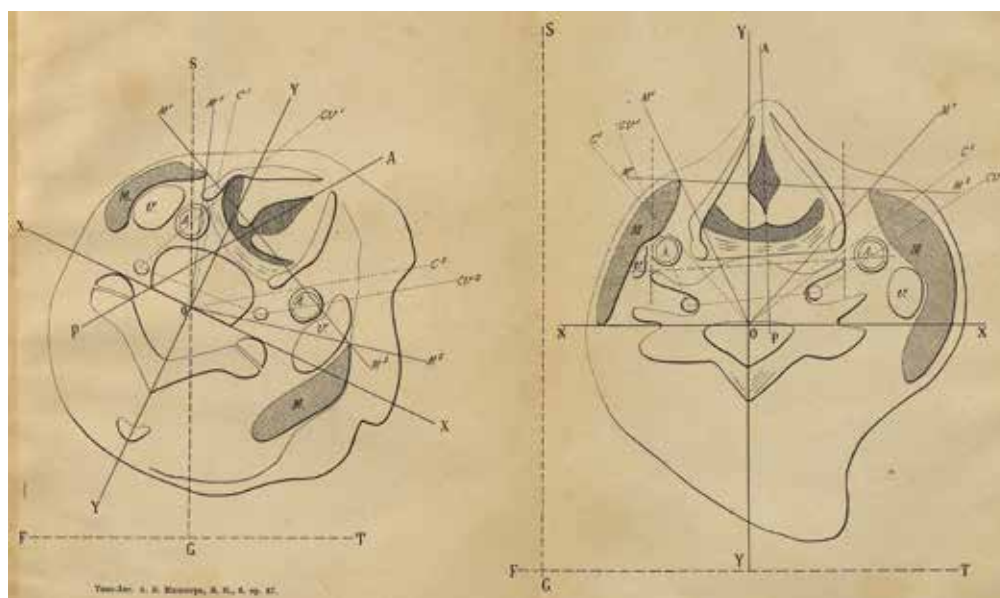
сти и др. Более того, была продемонстрирована возможность использования нежесткой аддитивной печати анатомических структур в процессе обучения студентов [15]. Было обнаружено, что нежесткие модели точно воспроизводят изменения *in vivo*, зарегистрированные с помощью функциональной компьютерной томографии. Наконец, в качестве метода предоперационного планирования также была предложена аддитивная печать персонализированных сегментов шейного отдела позвоночника [16].

Тайваньские ученые Ю. Цанг и соавт. применили методу конечно-элементного анализа для изучения влияния различных высот трансплантата межпозвонкового диска на соседний сегмент и напряжение сегмента трансплантата после передней цервикальной дискэктомии C4-C5 и спондилодеза. Авторами была построена детальная,

¹ Делицин С.Н. К вопросу о смещении органов шеи при некоторых движениях головы: дис. ... д-ра мед. наук. СПб.: тип. М.М. Стасюлевича; 1889. 131 с.

● **Рисунок 3.** Анатомические иллюстрации С.Н. Делицина, демонстрирующие смещение органов шеи при различном положении головы в пространстве

● **Figure 3.** Anatomical illustrations by S.N. Delitsin, demonstrating the displacement of the neck organs with different head positions in space: on the left, the head turns 90° degrees to the right



Слева – поворот головы на 90° вправо. Поперечный распил шеи на уровне верхнего края щитовидного хряща и соединения 4-го и 5-го шейных позвонков. Справа – наклон головы на 50° вправо. Поперечный распил шеи на уровне верхнего края щитовидного хряща и 5-го шейного позвонка

Cross-section of the neck at the level of the upper edge of the thyroid cartilage and the junction of the 4 and 5 cervical vertebrae. On the right – tilt the head 50° to the right. Cross-section of the neck at the level of the upper edge of the thyroid cartilage and the 5th cervical vertebra

стереометрически точная модель шейного отдела позвоночника на основе данных компьютерной томографии здорового взрослого мужчины. Авторы последовательно изменяли высоту трансплантата на уровне C4-C5, приводя ее, соответственно, к 90, 150, 175 и 200% от предоперационной высоты диска и моделировали послеоперационные сценарии с различной высотой трансплантата. Был проведен анализ напряжений на соседнем сегменте и сегменте трансплантата. Авторы в своей работе убедительно показали, что высота трансплантата оказывает существенное влияние на нагрузку на соседний сегмент и сегмент установки трансплантата после передней шейной дискэктомии и спондилодеза. Высота трансплантата 150% оказалась оптимальной высотой трансплантата для сегмента C4-C5 с наименьшим напряжением на соседнем сегменте и сегменте трансплантата [17].

Несмотря на тот факт, что к настоящему времени были предприняты отдельные попытки описания закономерностей смещения органов и мышечно-фасциальных слоев шеи при поворотах головы, единой системы описания этих изменений, равно как и механизмов последних, никто из исследователей так и не смог сформулировать. Имея в своем распоряжении последние достижения современной науки и техники, мы предприняли очередную попытку создать систему описания сложных динамических процессов в области шеи с применением данных МРТ и оригинальной антропоморфной конечно-элементной модели [18, 19].

Цель данной работы – изучить закономерности смещения фасциальных слоев шеи при поворотах головы на 20° и 50°, используя данные топографо-анатомических исследований и метод конечно-элементного моделирования.

● **Таблица 1.** Средние значения антропометрических показателей, характеризующих длину шеи

● **Table 1.** Average values of anthropometric indicators characterizing the length of the neck

Антропометрические измерения шеи	Короткие	Средние	Длинные
Высота шеи спереди, см	7,16	9,21	11,09
Высота шеи сзади, см	7,01	8,41	9,53

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Топографо-анатомическое исследование

Были изучены результаты 18 МРТ-исследований добровольцев обоих полов со средним промежуточным типом шеи, возрастом от 19 до 42 лет, не имеющих патологических изменений в области шеи.

При определении конституциональной формы шеи была использована методика антропометрических измерений шеи, разработанная на кафедре оперативной хирургии и топографической анатомии Воронежской государственной медицинской академии им. Н.Н. Бурденко². Ниже в виде таблиц приведены антропометрические показатели, которые использовались в настоящем исследовании при определении формы шеи (табл. 1, 2).

² Малеев Ю.В. Топографо-анатомическое обоснование оперативных вмешательств в передней области шеи: рационализация хирургических подходов: автореф. дис. ... д-ра мед. наук. Воронеж; 2010. 48 с.; Его же. Хирургическая анатомия щитовидной железы в связи с типовыми особенностями шеи: автореф. дис. ... канд. мед. наук. Воронеж; 1999. 23 с.

● **Таблица 2.** Средние значения антропометрических показателей, характеризующих ширину шеи

● **Table 2.** Average values of anthropometric indicators characterizing the width of the neck

Антропометрические измерения шеи	Толстые	Промежуточные	Тонкие
Ширина шеи на уровне подъязычной кости, см	12,54	10,76	9,44
Расстояние от яремной вырезки грудины до остистого отростка VII шейного позвонка, см	14,5	12,57	11,16

Всем добровольцам было выполнено МРТ-исследование области шеи при прямом положении головы, а также при повороте головы вправо относительно туловища на 20° и 50° . После этого был произведен анализ полученных данных, целью которого было изучение углового и вращательного смещения точек на фасциях шеи (рис. 4) в горизонтальных плоскостях на уровне соответствующих межпозвонковых дисков сегмента шейного отдела позвоночника C2-C7. Далее с помощью программного обеспечения Vidar Dicom Viewer производили измерение расстояния от центра соответствующего межпозвонкового диска до указанных точек и величины их углового смещения при повороте головы; величину вращательного смещения точек вычисляли с применением теоремы косинусов. Результаты измерений и вычислений заносили в таблицы (табл. 3–5).

Статистический анализ данных проводился с использованием языка Python, основные библиотеки pandas, numpy, scipy. Для визуализации данных использованы библиотеки matplotlib и seaborn. Статистическая значимость рассчитана с помощью метода scipy.stats.ttest_ind, реализующего двусторонний t-тест. Результаты статистической обработки полученных данных приведены ниже в виде графиков (рис. 9–16).

Конечно-элементное моделирование

Для построения антропоморфной конечно-элементной модели шеи были использованы данные КТ-исследования пациента (мужчина 24 лет) без каких-либо патологических изменений органов и скелетно-мышечного аппарата шеи. В результате последующей обработки данных КТ-исследования была построена персонализированная антропоморфная конечно-элементная модель области шеи, с помощью которой была выполнена серия виртуальных топографо-анатомических исследований.

При создании виртуальной модели шеи главный акцент был сделан на точном и подробном стереометрическом воспроизведении анатомических особенностей этой области [18, 19]. На основе полученных данных компьютерной томографии была создана мультипланарная реконструкция шеи. Для каждой анатомической структуры была выполнена рутинная сегментация в трех проекциях. Из полученного набора контуров была создана трехмерная модель, которая затем была

преобразована в полигональную (STL – стереолитографическую) модель. Модели NURBS (NURBS – неоднородный рациональный B-сплайн) были сформированы из моделей STL путем сплайновой интерполяции вершин полигонов и формирования гладких поверхностей из полученных сплайнов. Модели NURBS паравертбральных мышц были сгенерированы на основе BodyParts3D архивом базы данных Life Science [21]. Сборка модели, а также создание моделей межпозвонковых дисков и фасеточных суставов были выполнены в программном обеспечении SolidWorks. Конечная сетка конечных элементов состояла примерно из 570 000 шестигранных (C3D8) и 440 000 тетраэдрических (C3D4) элементов. Все контактные взаимодействия были созданы в модуле Abaqus Contact Manager программного обеспечения HyperMesh. Полученная модель FE была импортирована в качестве орфанной сетки в Abaqus CAE для определения механических свойств материалов и формулирования граничных условий для биомеханического анализа модели. Данные взяты из исследований [22–30]. Материал позвонков был смоделирован как однородный, изотропный, линейно эластичный.

Было выполнено моделирование поворота головы относительно туловища на 20° и 50° с последующей оценкой величины вращательного смещения и изменения напряжения моделей фасций в указанных точках.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

1. *Угловое и вращательное смещение точек А, В, С, D, Е на уровне межпозвонкового диска C4-C5 при повороте головы относительно туловища на 20° и 50° (рис. 5, 6; табл. 3).*

Смещение фасций на уровне межпозвонкового диска C6-C7 имеет следующие общие закономерности (рис. 9–16, табл. 3, 5):

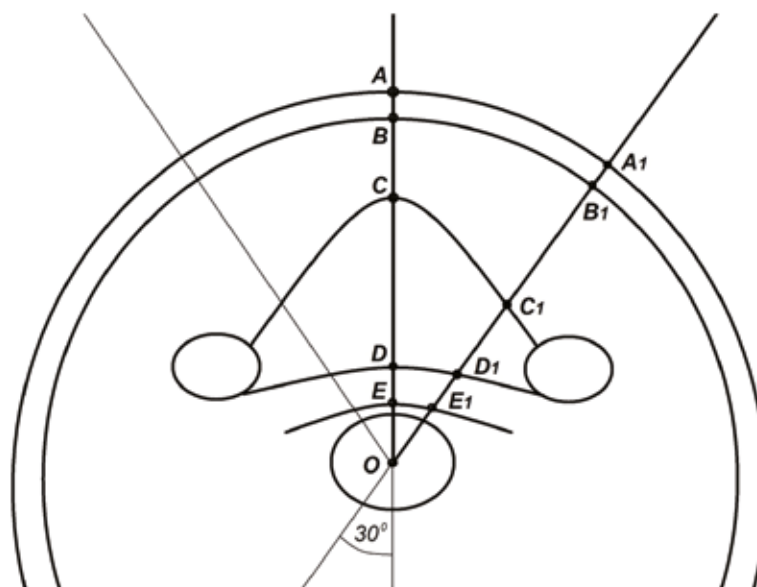
1. Величины вращательного и углового смещения фасций имеют нелинейный характер.
2. Направление смещения для всех фасций на этом уровне соответствует направлению поворота головы.
3. Для фасций, расположенных на большем расстоянии от центра межпозвонкового диска C4-C5, характерны большие величины углового и вращательного смещения.
4. Фасции шеи смещаются относительно друг друга при поворотах головы вследствие различия значений углового смещения для каждой из фасций на определенных уровнях.

2. *Угловое и вращательное смещение точек А, В, С, D, Е на уровне межпозвонкового диска C6-C7 при повороте головы относительно туловища на 20° и 50° (рис. 7, 8; табл. 4).*

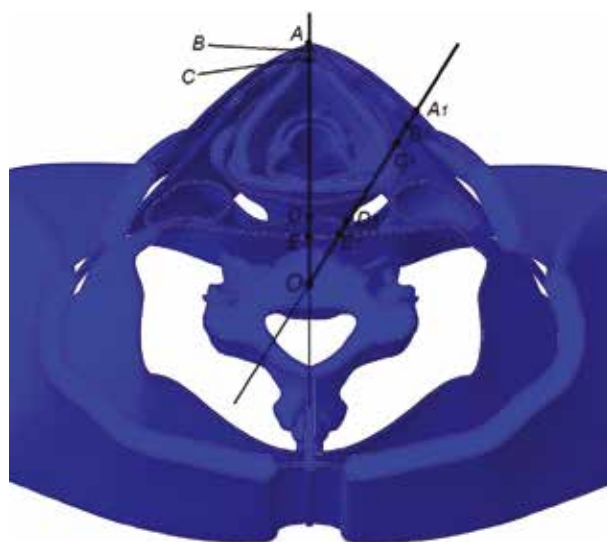
Смещение фасций на уровне межпозвонкового диска C6-C7 имеет следующие общие закономерности (рис. 9–16, табл. 4, 5):

1. Величины вращательного и углового смещения фасций имеют нелинейный характер.
2. Направление смещения для всех фасций на этом уровне соответствует направлению поворота головы,

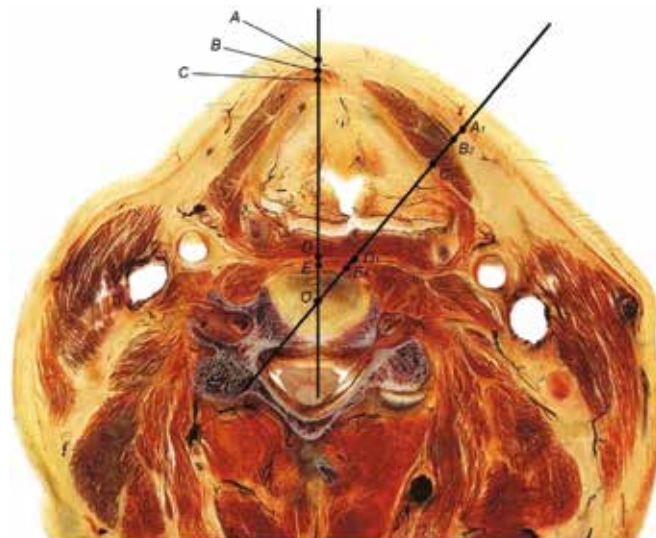
- **Рисунок 4.** Горизонтальный срез шеи на уровне межпозвонкового диска C4-C5 [20]
 ● **Figure 4.** Horizontal section of the neck at the level of the intervertebral disc C4-C5 [20]



(a)



(b)



(c)

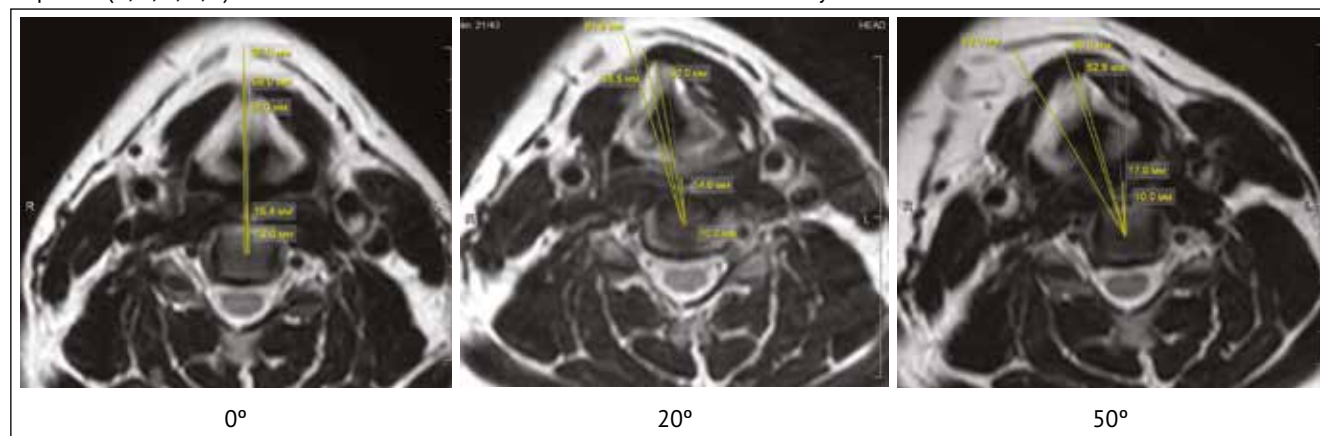
a – схематическое изображение; b – срез антропоморфной конечно-элементной модели; c – пластинированный срез: O – центр межпозвонкового диска C4-C5; A – точка на срезе 2-й фасции шеи в сагиттальной плоскости; B – точка на срезе 3-й фасции шеи в сагиттальной плоскости; C – точка на срезе парietальной пластинки 4-й фасции шеи в сагиттальной плоскости; D – точка на срезе дорзальной части висцеральной пластинки 4-й фасции шеи в сагиттальной плоскости; E – точка на срезе 5-й фасции шеи в сагиттальной плоскости; A₁, B₁, C₁, D₁, E₁ – аналогичные точки, лежащие на пересечении срезов этих же фасций и плоскости, составляющей с сагиттальной плоскостью угол 30°

a – a schematic image; b – a section of an anthropomorphic finite element model; c – a plastinated section: O – the center of the intervertebral disc C4-C5; A – a point on the slice of the 2nd fascia of the neck in the sagittal plane; B – a point on a slice of the 3rd fascia of the neck in the sagittal plane; C – a point on a slice of the parietal plate of the 4th fascia of the neck in the sagittal plane; D – a point on a slice of the dorsal part of the visceral plate of the 4th fascia of the neck in the sagittal plane; E – a point on a slice of the 5th fascia of the neck in the sagittal plane; A₁, B₁, C₁, D₁, E₁ are similar points lying at the intersection of sections of the same fascia and the plane that makes up the angle 30° with the sagittal plane

Примечание. Использована классификация фасций шеи по В.Н. Шевкуненко

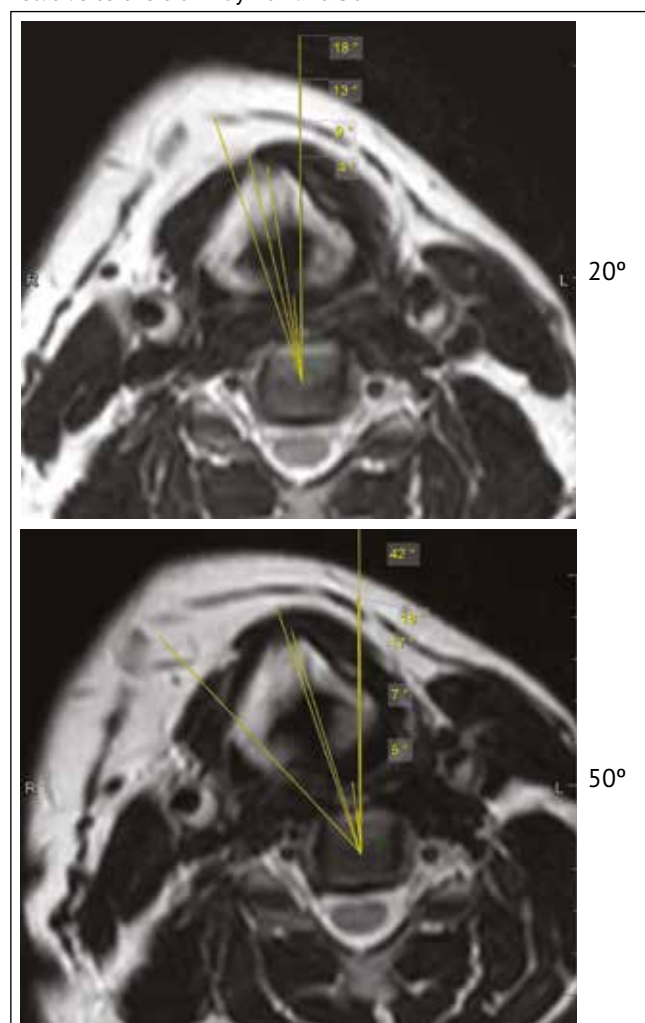
● **Рисунок 5.** МРТ-исследование: горизонтальный срез на уровне межпозвонкового диска C4-C5. Показано вращательное смещение точек (A, B, C, D, E) при повороте головы относительно туловища на 20° и 50°

● **Figure 5.** MRI examination: horizontal section at the level of the intervertebral disc C4-C5. The rotational displacement of points (A, B, C, D, E) is shown when the head is rotated relative to the trunk by 20° and 50°



● **Рисунок 6.** МРТ-исследование: горизонтальный срез на уровне межпозвонкового диска C4-C5. Показано угловое смещение точек (A, B, C, D, E) при повороте головы относительно туловища на 20° и 50°

● **Figure 6.** MRI examination: horizontal section at the level of the intervertebral disc C4-C5. The angular displacement of points (A, B, C, D, E) is shown when the head is rotated relative to the trunk by 20° and 50°



● **Таблица 3.** Результаты измерений смещения точек (мм) по данным МРТ. Горизонтальный срез на уровне межпозвонкового диска C4-C5; результаты углового смещения точек

● **Table 3.** Results of the displacement of points (mm) measurements according to MRI data. Horizontal section at the level of the intervertebral disc C4-C5; results of angular displacement of points

	0°	20° dex	50° dex	$\alpha 1$	$\alpha 2$	0°	20° dex	50° dex
	Расстояние от центра диска			Угловое смещение		Смещение точек		
A	67	62	69	18°	42°	0	20,8	48,8
B	58	56,5	60	13°	18°	0	13,1	18,6
C	52	52	53	9°	17°	0	8,2	15,6
D	16,5	15	17	4°	7°	0	1,2	2,1
E	10	10	10	0°	5°	0	0	0,9
A1	57	52,5	50	18°	42°	0	17,7	38,9
B1	51	43	36,5	13°	18°	0	13,3	19,8
C1	38,5	32	25	9°	17°	0	8,5	16,3
D1	18	22	25	4°	7°	0	4,2	7,5
E1	12	11,5	12,5	0°	5°	0	0,5	1,2

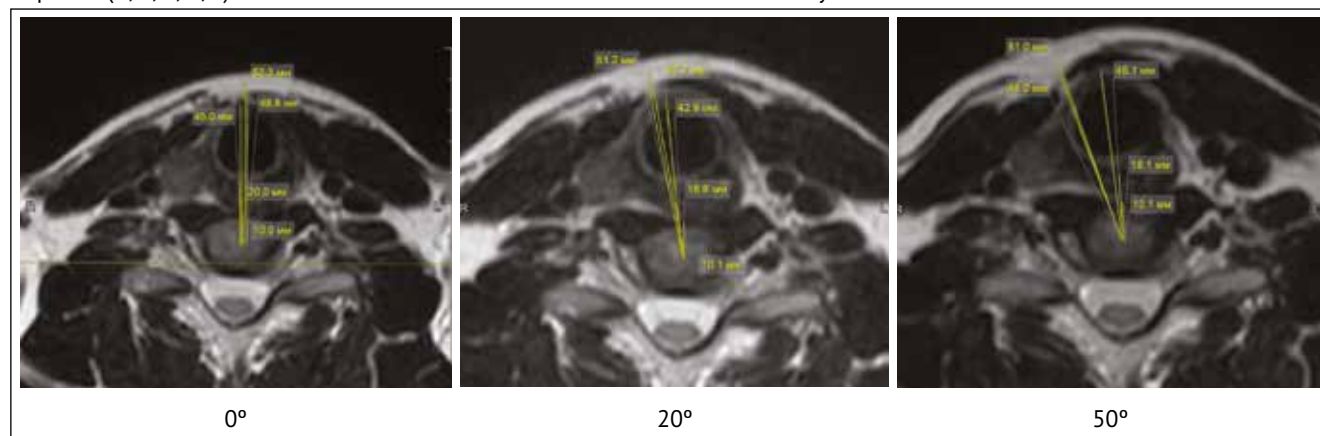
Примечание. В таблице приведены значения, полученные при анализе исследования №12.

за исключением дорзальной части висцеральной пластинки 4-й фасции шеи (fascia endocervicalis), которая на данном уровне вместе с пищеводом смещается в противоположном относительно оси симметрии направлении.

- Для фасций, расположенных на большем расстоянии от центра межпозвонкового диска C6-C7, характерны большие величины углового и вращательного смещения.
- Фасции шеи смещаются относительно друг друга при поворотах головы вследствие различия значений углового смещения для каждой из фасций на определенных уровнях (табл. 5, рис. 12–16).

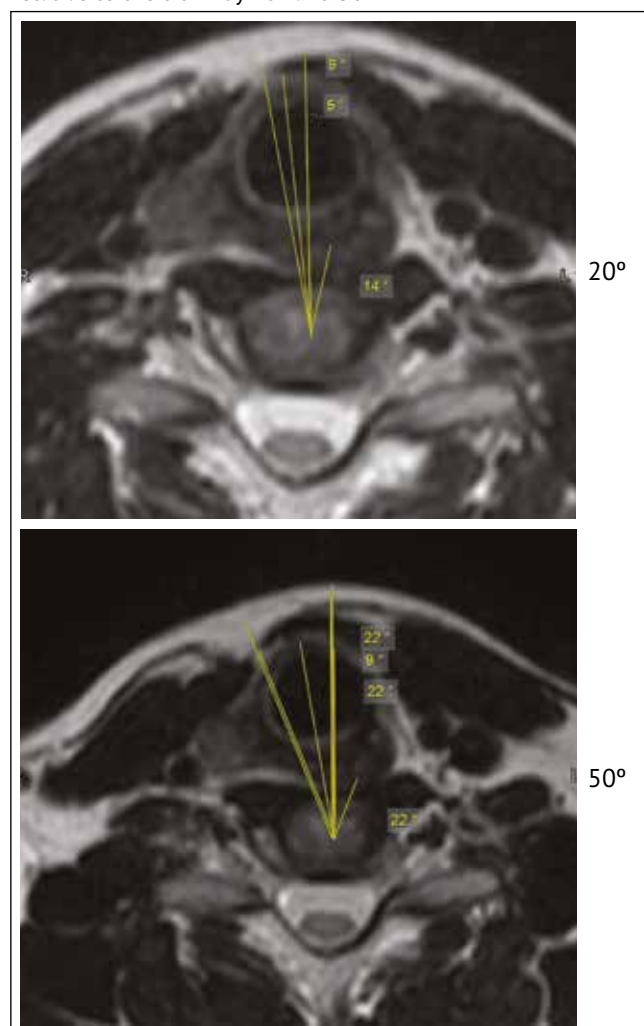
● **Рисунок 7.** МРТ-исследование: горизонтальный срез на уровне межпозвонкового диска C6-C7. Показано вращательное смещение точек (A, B, C, D, E) при повороте головы относительно туловища на 20° и 50°

● **Figure 7.** MRI examination: horizontal section at the level of the intervertebral disc C6-C7. The rotational displacement of points (A, B, C, D, E) is shown when the head is rotated relative to the trunk by 20° and 50°



● **Рисунок 8.** МРТ-исследование: горизонтальный срез на уровне межпозвонкового диска C6-C7. Показано угловое смещение точек (A, B, C, D, E) при повороте головы относительно туловища на 20° и 50°

● **Figure 8.** MRI examination: horizontal section at the level of the intervertebral disc C6-C7. The angular displacement of points (A, B, C, D, E) is shown when the head is rotated relative to the trunk by 20° and 50°



● **Таблица 4.** Результаты измерений смещения точек (мм) по данным МРТ. Горизонтальный срез на уровне межпозвонкового диска C6-C7

● **Table 4.** Results of the points displacement (mm) measurements according to MRI data. Horizontal section at the level of the intervertebral disc C6-C7

	0°	20°dex	50°dex	α_1	α_2	0°	20°dex	50°dex
	Расстояние от центра диска			Угловое смещение		Смещение точек		
A	52	53,5	51	8°	23°	0	7,5	20,6
B	48,5	50	46	7°	22°	0	6,2	18,2
C	45	46	45	5°	9°	0	4,1	7,1
D	20	17	18	-14°	-21°	0	-5,4	-7,2
E	10	10	10	0°	1°	0	0	0,2
A1	54	51	56	8°	22°	0	7,9	21,1
B1	47	47,5	42	7°	22°	0	5,8	17,7
C1	37	43	45	5°	9°	0	6,9	10,3
D1	20	16,5	18,5	-14°	-21°	0	-5,6	7,2
E1	11	11	12	0°	0°	0	0	1

Примечание. В таблице приведены значения, полученные при анализе исследования №12.

Результаты статистической обработки полученных данных топографо-анатомического исследования

Смещение фасций шеи имеет следующие общие закономерности (рис. 9–16, табл. 4, 5):

1. Величины вращательного и углового смещения всех фасций шеи имеют нелинейный характер (величины вращательного и углового смещений не находятся в прямо-пропорциональной зависимости).
2. Фасции шеи смещаются относительно друг друга при поворотах головы вследствие различия значений углового смещения для каждой из фасций на определенных уровнях (табл. 5, рис. 12–16).

● **Таблица 5.** Результаты измерений углового смещения точек на уровне межпозвонковых дисков сегмента шейного отдела позвоночника C2-C7

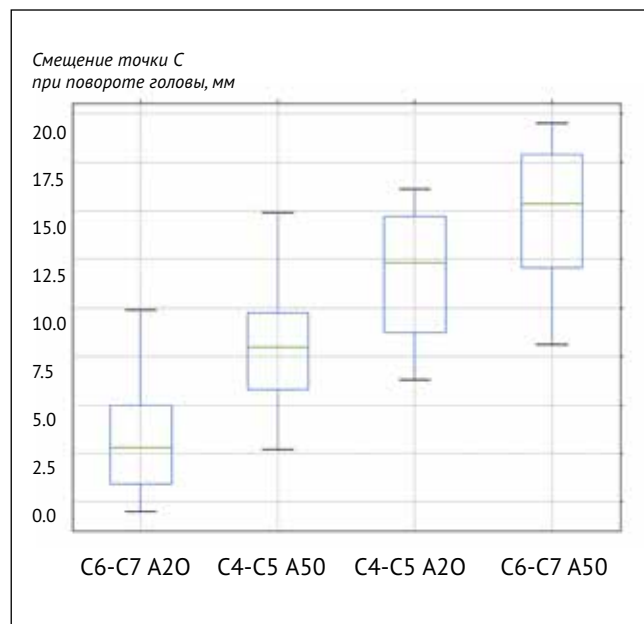
● **Table 5.** The results of the angular displacement of points measurements at the level of the intervertebral discs of the segment of the cervical spine C2-C7

	C2-C3		C3-C4		C4-C5		C5-C6		C6-C7	
	20°	50°	20°	50°	20°	50°	20°	50°	20°	50°
A	22°	45°	22°	45°	18°	42°	10°	27°	8°	23°
B	22°	45°	21°	45°	13°	18°	8°	25°	7°	22°
C	22°	45°	19°	43°	9°	17°	5°	13°	5°	9°
D	5°	6°	5°	20°	4°	7°	2°	8°	-14°	-21°
E	4°	10°	2°	5°	0°	5°	0°	2°	0°	1°

Примечание. В таблице приведены значения, полученные при анализе исследования №12.

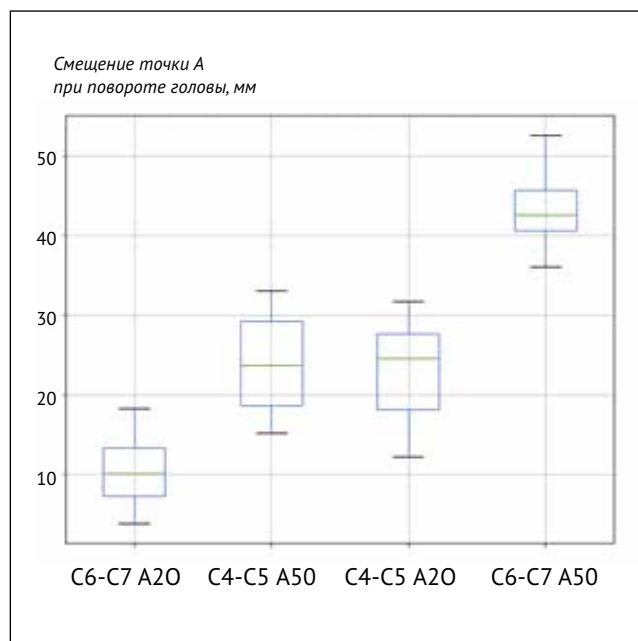
● **Рисунок 10.** Величина вращательного смещения точек C20 и C50 для уровней межпозвонковых дисков C6-C7 и C4-C5

● **Figure 10.** The magnitude of the rotational displacement of points C20 and C50 for the levels of intervertebral discs C6-C7 and C4-C5



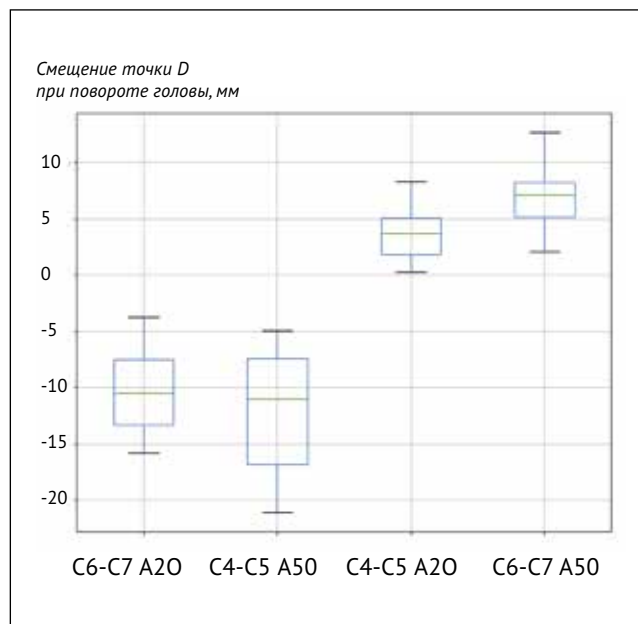
● **Рисунок 9.** Величина вращательного смещения точек A₂₀ и A₅₀ для уровней межпозвонковых дисков C6-C7 и C4-C5

● **Figure 9.** The magnitude of the rotational displacement of points A₂₀ and A₅₀ for the levels of intervertebral discs C6-C7 and C4-C5



● **Рисунок 11.** Величина вращательного смещения точек D20 и D50 для уровней межпозвонковых дисков C6-C7 и C4-C5

● **Figure 11.** The magnitude of the rotational displacement of points D20 and D50 for the levels of intervertebral discs C6-C7 and C4-C5



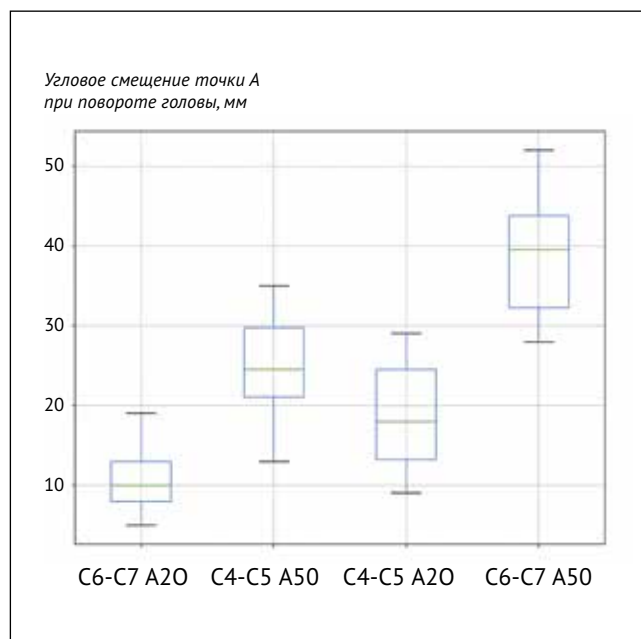
3. Величина углового смещения 2-й фасции шеи (lamina superficialis fasciae cervicalis propriae) на уровне межпозвонковых дисков C2-C3, C3-C4 и C4-C5 при повороте головы 20°, а также на уровне диска C4-C5 при повороте головы на 50° превышает значение угла поворота головы относительно туловища

за счет деформирующего натяжения, возникающего при сокращении грудинно-ключично-сосцевидной мышцы на стороне поворота.

4. Направление вращательного и углового смещения для всех фасций на уровне C6-C7 соответствует направлению поворота головы, за исключением дор-

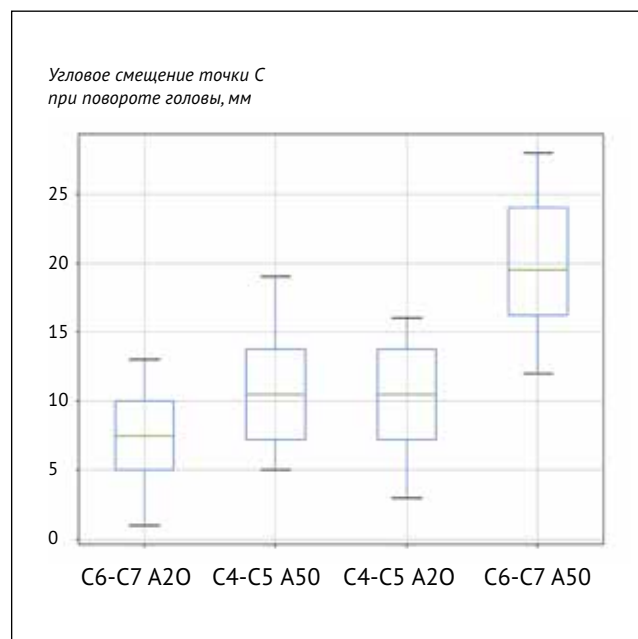
● **Рисунок 12.** Величина углового смещения точек A_{20} и A_{50} для уровней межпозвонковых дисков C6-C7 и C4-C5

● **Figure 12.** The magnitude of the angular displacement of points A_{20} and A_{50} for the levels of intervertebral discs C6-C7 and C4-C5



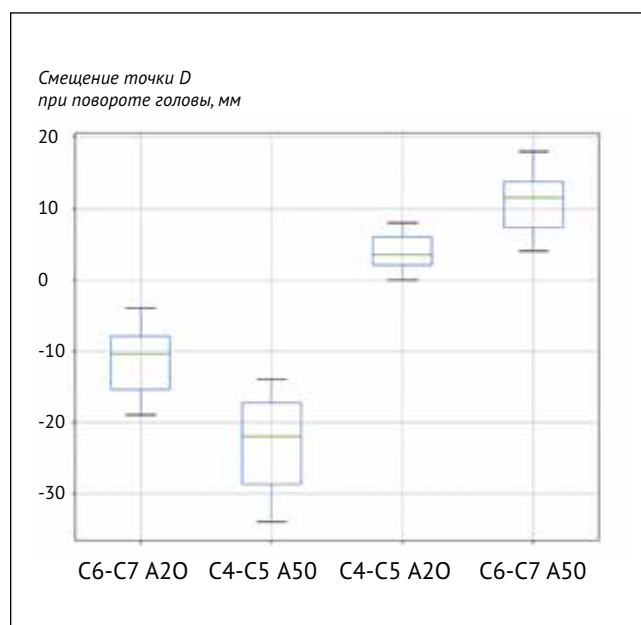
● **Рисунок 13.** Величина углового смещения точек C_{20} и C_{50} для уровней межпозвонковых дисков C6-C7 и C4-C5

● **Figure 13.** The magnitude of the angular displacement of points C_{20} and C_{50} for the levels of intervertebral discs C6-C7 and C4-C5



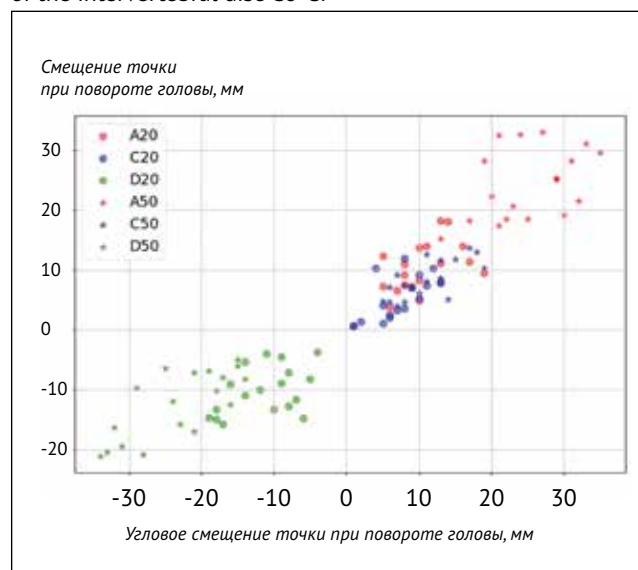
● **Рисунок 14.** Величина углового смещения точек D_{20} и D_{50} для уровней межпозвонковых дисков C6-C7 и C4-C5

● **Figure 14.** The magnitude of the angular displacement of points D_{20} and D_{50} for the levels of intervertebral discs C6-C7 and C4-C5



● **Рисунок 15.** Зависимость величины вращательного смещения точек A, C, D от соответствующих величин углового смещения (αA , αC , αD) для уровня межпозвонкового диска C6-C7

● **Figure 15.** The dependence of the magnitude of the rotational displacement of points A, C, D on the corresponding values of the angular displacement (αA , αC , αD) for the level of the intervertebral disc C6-C7



зальной части висцеральной пластинки 4-й фасции шеи (fascia endocervicalis), которая на данном уровне вместе с пищеводом смещается в противоположном относительно оси симметрии направлении.

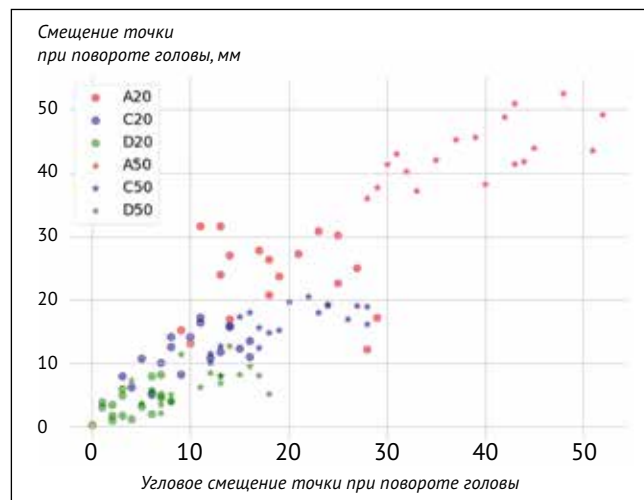
5. Для фасций, расположенных на большем расстоянии от центра межпозвонкового диска C6-C7, характерны

большие величины углового и вращательного смещения, при этом направление смещения относительно оси симметрии может различаться.

6. Скорость изменения отношения величин вращательного и углового смещений выше на уровне нижних сегментов шейного отдела позвоночника (рис. 15, 16).

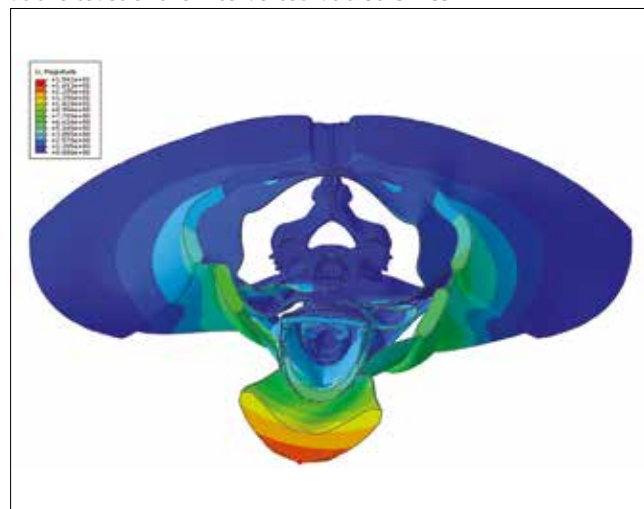
● **Рисунок 16.** Зависимость величины вращательного смещения точек A, C, D от соответствующих величин углового смещения (α A, α C, α D) для уровня межпозвонкового диска C4-C5

● **Figure 16.** The dependence of the magnitude of the rotational displacement of points A, C, D on the corresponding values of the angular displacement (α A, α C, α D) for the level of the intervertebral disc C4-C5



● **Рисунок 17.** Эпюра перемещений при повороте головы относительно туловища на 20° вправо. Горизонтальный срез на уровне межпозвонкового диска C4-C5

● **Figure 17.** The plot of movements when turning the head relative to the trunk 20° to the right. Horizontal section at the level of the intervertebral disc C4-C5



● **Таблица 6.** Результаты измерений смещения точек (мм). Горизонтальный срез на уровне межпозвонкового диска C6-C7

● **Table 6.** Measurement results of point displacement (mm). Horizontal section at the level of the intervertebral disc C6-C7

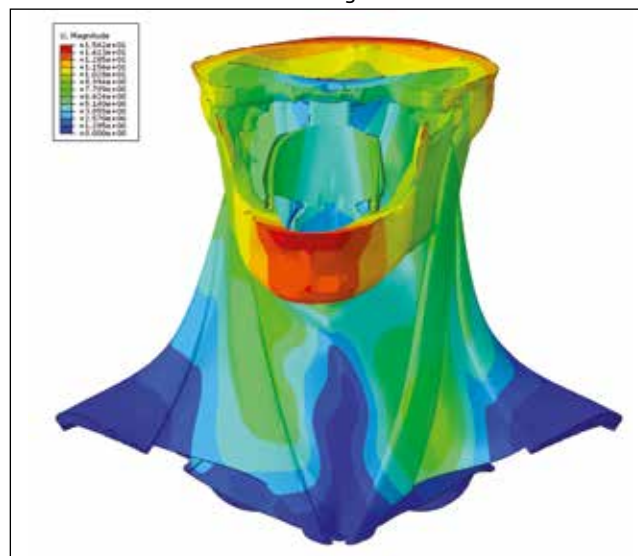
	0°	20° dex	50° dex
A	0	15,63528	39,13748
B	0	10,73921	15,52892
C	0	5,58392	12,14794
D	0	0,81543	2,04383
E	0	0,00381	0,62951

Результаты виртуального эксперимента с применением антропоморфной конечно-элементной модели

Были выполнены виртуальные эксперименты поворота головы относительно туловища на 20° и 50°; построены трехмерные эпюры смещения и напряжения (рис. 17–24, табл. 6–8).

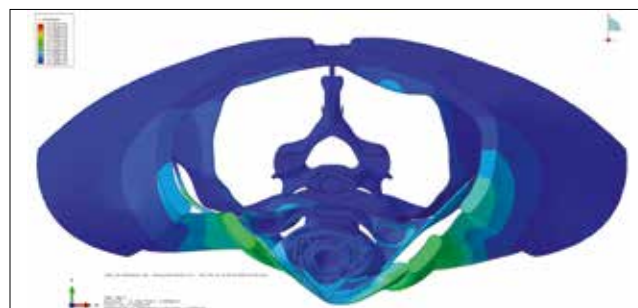
● **Рисунок 19.** Эпюра перемещений при повороте головы относительно туловища на 20° вправо. Вид спереди

● **Figure 19.** The plot of movements when turning the head relative to the trunk 20° to the right. Front view



● **Рисунок 18.** Эпюра перемещений при повороте головы относительно туловища на 20° вправо. Горизонтальный срез на уровне межпозвонкового диска C4-C5

● **Figure 18.** The plot of movements when turning the head relative to the trunk 20° to the right. Horizontal section at the level of the intervertebral disc C4-C5



● **Таблица 7.** Результаты измерений смещения точек (мм). Горизонтальный срез на уровне межпозвонкового диска C6-C7

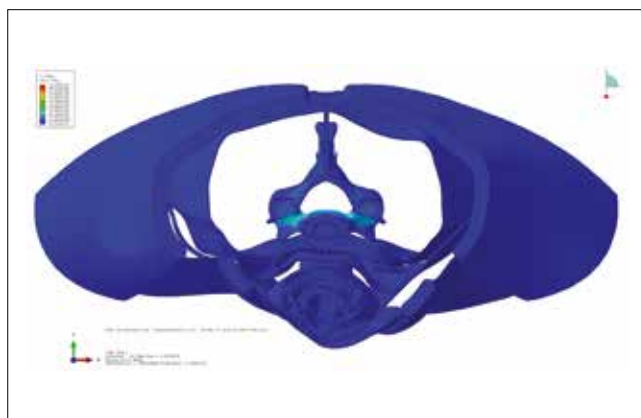
● **Table 7.** Measurement results of point displacement (mm). Horizontal section at the level of the intervertebral disc C6-C7

	0°	20° dex	50° dex
A	0	6,93535	16,36893
B	0	4,32077	14,73981
C	0	3,86262	6,19742
D	0	-0,91862	-2,56348
E	0	0,66802	0,94762

Результаты измерений радиального смещения фасциальных слоев антропоморфной конечно-элементной модели демонстрируют положительную корреляцию с данными топографо-анатомического исследования, что подтверждает адекватность созданной модели и теоретическую возможность экстраполяции данных, полученных с ее применением, на реальный биологический объект.

● **Рисунок 20.** Эпюра напряжений при повороте головы относительно туловища на 20° вправо. Горизонтальный срез модели на уровне межпозвонкового диска C6-C7

● **Figure 20.** The stress plot when turning the head relative to the trunk 20° degrees to the right. Horizontal section of the model at the level of the intervertebral disc C6-C7



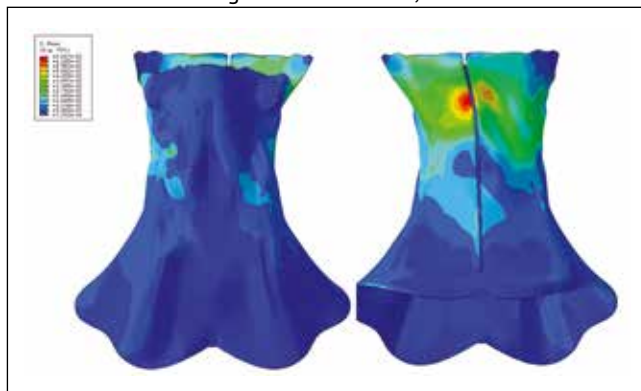
● **Таблица 8.** Изменение напряжения в точках (МПа). Срез на уровне межпозвонкового диска C6-C7

● **Table 8.** Voltage change in points (MPa). A slice at the level of the intervertebral disc C6-C7

	0°	20° dex	50° dex
A	0	13,1161E-03 МПа	15,2137E-03 МПа
B	0	3,27393E-03 МПа	5,52674E-03 МПа
C	0	5,50957E-03 МПа	6,17392E-03 МПа
D	0	2,51236E-03 МПа	4,31639E-03 МПа
E	0	3,921E-03 МПа	6,261E-03 МПа

● **Рисунок 21.** Эпюра напряжений 5-й фасции шеи при повороте головы на 20° вправо: а – вид спереди; б – вид сзади

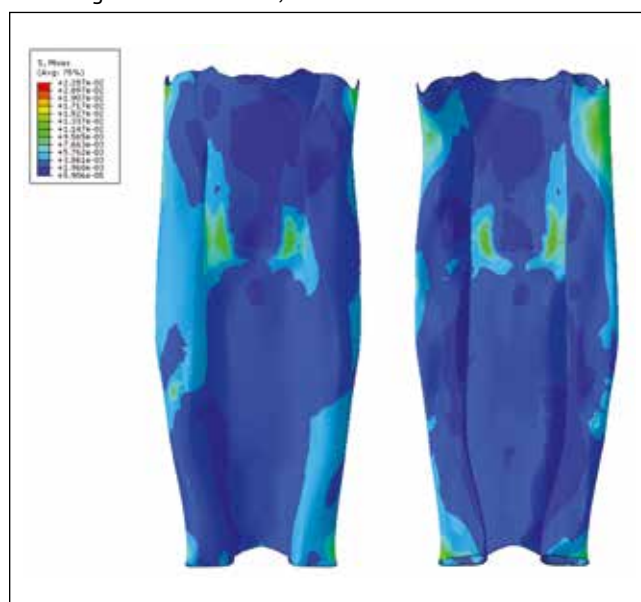
● **Figure 21.** Stress diagram of the neck fascia 5 when turning the head 20° to the right: a – front view; b – rear view



Кроме стереометрических изменений анатомических объектов, конечно-элементная антропоморфная модель шеи позволяет в режиме виртуального эксперимента оценить изменения физических свойств мышечно-фасциальных слоев шеи при поворотах головы. Результаты этих измерений приведены ниже в виде эпюр напряжения (рис. 20–24) и таблицы (табл. 8).

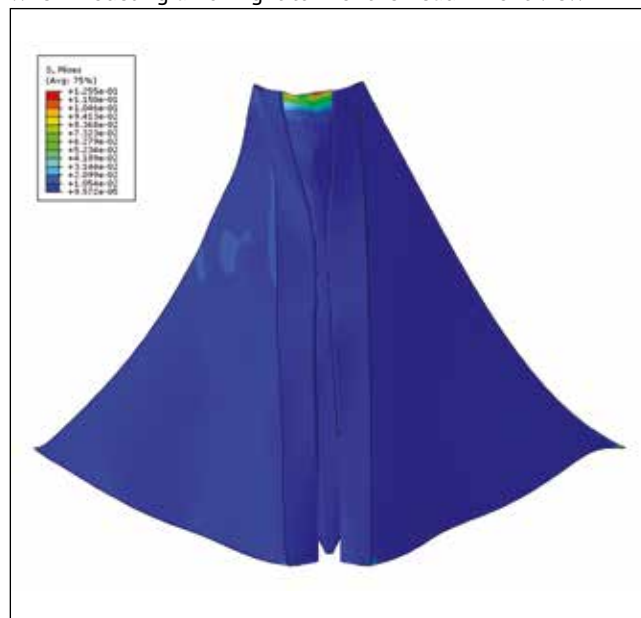
● **Рисунок 22.** Эпюра напряжений париетальной пластинки 4-й фасции шеи при моделировании поворота головы на 20° вправо: а – вид спереди; б – вид сзади

● **Figure 22.** The stress diagram of the parietal plate of the 4th fascia of the neck when modeling the head rotation 20° to the right: a – front view; b – rear view



● **Рисунок 23.** Эпюра напряжений 3-й фасции шеи при моделировании поворота головы на 20° вправо – вид спереди

● **Figure 23.** The stress diagram of the 3 fascia of the neck when modeling a 20° right turn of the head – front view



Ниже приведены эпюры изменения напряжения отдельных фасций антропоморфной модели при повороте головы на 20° вправо (рис. 21–24).

При анализе изменения эпюр напряжения моделей отдельных фасций выявлены следующие закономерности:

1. Наиболее сильные изменения напряжения моделей 2-й и 5-й фасций при повороте возникают в задних их отделах в области вейной связки (рис. 21, 24).
2. Довольно значимые изменения напряжения модели париетальной пластинки 4-й фасции шеи отмечаются в области верхних отделов футляров СНП шеи (рис. 22).
3. Напряжение модели 3-й фасции при повороте практически не изменяется (рис. 24), за исключением небольшого участка в подъязычном отделе.

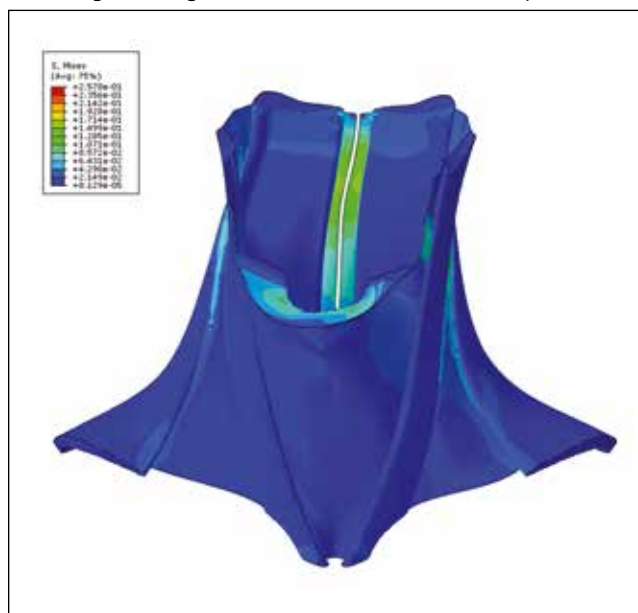
Полученные данные имеют большой теоретический интерес для остеопатии и восстановительной медицины, т. к. ни один из существующих в настоящий момент методов не позволяет достоверно оценить изменения физического состояния глубоких структур организма.

ВЫВОДЫ

1. Величины вращательного и углового смещения всех фасций шеи имеют нелинейный характер (величины вращательного и углового смещений не находятся в прямо пропорциональной зависимости).
2. Фасции шеи смещаются относительно друг друга при поворотах головы вследствие различия значений углового смещения для каждой из фасций на определенных уровнях.
3. Величина углового смещения 2-й фасции шеи на уровне межпозвонковых дисков C2-C3, C3-C4 и C4-C5 при повороте головы 20°, а также на уровне диска C4-C5 при повороте головы на 50° превышает значение угла поворота головы относительно туловища за счет деформирующего натяжения, возникающего при растяжении грудинно-ключично-сосцевидной мышцы на стороне поворота.
4. Направление вращательного и углового смещения для всех фасций на уровне C6-C7 соответствует направлению поворота головы, за исключением дорзальной части висцеральной пластинки 4-й фасции шеи, которая на данном уровне вместе с пищеводом смещается в противоположенном относительно оси симметрии направлении.
5. Для фасций, расположенных на большем расстоянии от центра межпозвонкового диска, характерны большие величины углового и вращательного смещения, при этом на уровне диска C6-C7 направление смещения относительно оси симметрии может различаться.

● **Рисунок 24.** Эпюра напряжений 2-й фасции шеи при моделировании поворота головы на 20° вправо: вид спереди и сверху

● **Figure 24.** Stress diagram of the 2 fascia of the neck when modeling a 20° right turn of the head: front and top view



6. Скорость изменения отношения величин вращательного и углового смещений выше на уровне нижних сегментов шейного отдела позвоночника.
7. Результаты измерений вращательного смещения фасциальных слоев антропоморфной конечно-элементной модели демонстрируют положительную корреляцию с данными топографо-анатомического исследования, а данные, полученные при фиксации изменения напряжений моделей фасций, представляют значительный интерес с точки зрения моделирования соматической дисфункции.

Таким образом, описанная в данной статье сложная структурная и биомеханическая организация шеи как области человеческого тела клинически выражается в том, что даже относительно небольшое изменение структуры, например послеоперационный рубец, может запустить целый каскад биомеханических изменений, способствующих формированию соматической дисфункции или патологии. В связи с этим закономерности смещения мышечно-фасциальных слоев шеи в норме и при патологии необходимо учитывать при виртуальном моделировании соматической дисфункции шеи, а также в процессе диагностики и планирования остеопатических воздействий.



Поступила / Received 09.02.2023
Поступила после рецензирования / Revised 01.03.2023
Принята в печать / Accepted 06.03.2023

Список литературы / References

1. Мохов Д.Е., Беляев А.Ф., Азаренков М.Д., Аптекар И.А., Болотов Д.А., Вяльцев А.В. и др. *Остеопатическая диагностика соматических дисфункций в педиатрии: клинические рекомендации*. СПб.: Невский ракурс; 2015. 60 с. Режим доступа: http://www.osteopathy-official.ru/rekomendacii_pediatria.pdf?ysclid=lgmcrgrxnpr89098514.

Mokhov D.E., Belyaev A.F., Azarenkov M.D., Aptekar I.A., Bolotov D.A., Vyaltsev A.V. et al. *Osteopathic diagnosis of somatic dysfunctions. Clinical recommendations*. St Petersburg: Nevskiy rakurs; 2015. 60 p. (In Russ.) Available at: http://www.osteopathy-official.ru/rekomendacii_pediatria.pdf?ysclid=lgmcrgrxnpr89098514.

2. Schnell H., Wagner F.M., Locher H. Segmental and somatic dysfunction: How does manual medicine work? *Orthopade*. 2022;51(4):253–262. <https://doi.org/10.1007/s00132-022-04230-z>.
3. Schnell H. From acute coronary syndrome to zoster: Differential diagnostics in segmental and somatic dysfunction of the thoracic spine and ribs. *Orthopade*. 2022;51(4):274–282. <https://doi.org/10.1007/s00132-022-04227-8>.
4. 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. <https://doi.org/10.1007/s00132-022-04227-8>.
5. Andrews M.A.W. Stretch Receptor and Somatic Dysfunction: A Narrative Review. *J Am Osteopath Assoc*. 2019;119(8):511–519. <https://doi.org/10.7556/jaoa.2019.094>.
6. Liem T.A.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. <https://doi.org/10.7556/jaoa.2016.129>.
7. Tramontano M., Tamburella F., Dal Farra F., Bergna A., Lunghi C., Innocenti M. et al. International Overview of Somatic Dysfunction Assessment and Treatment in Osteopathic Research: A Scoping Review. *Healthcare (Basel)*. 2021;10(1):28. <https://doi.org/10.3390/healthcare10010028>.
8. Jung B., Bhutta B.S. Anatomy, Head and Neck, Neck Movements. *StatPearls*. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing; 2021. Available at: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK557555/>
9. Lazennec J.Y., Laudet C.G., Guérin-Surville H., Roy-Camille R., Saillant G. Dynamic anatomy of the acetabulum: an experimental approach and surgical implications. *Surg Radiol Anat*. 1997;19(1):23–30. <https://doi.org/10.1007/BF01627730>.
10. Armstrong C.G., Bahrani A.S., Gardner D.L. In vitro measurement of articular cartilage deformations in the intact human hip joint under load. *JBJS*. 1979;61(5):744–755. Available at: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/457718/>
11. McMurrich J.P. *Leonardo da Vinci, the anatomist*. Carnegie institution of Washington, Williams & Wilkins Company, Baltimore; 1930. Available at: https://embryology.med.unsw.edu.au/embryology/images/0/0c/1930_Leonardo_da_Vinci_-_the_anatomist.pdf.
12. Pirogov N.I. *Anatome Topographica Sectionibus Per Corpus Humanum Congelatum Triplici Directione Ductis Illustrata (Atlas): Fasciculi 1. 1A-1B*. St Petersburg; 1853. Available at: <https://collections.nlm.nih.gov/catalog/.nlm:nlmuid-61120970RX1-mvpart>.
13. Anderson P., Chapman P.M., Ma M., Rea P. Real-time medical visualization of human head and neck anatomy and its applications for dental training and simulation. *Cur Med Imag*. 2013;9(4):298–308. <https://doi.org/10.2174/15734056113096660004>.
14. Nguyen N., Wilson T.D. A head in virtual reality: Development of a dynamic head and neck model. *Anat Sci Educ*. 2009;2(6):294–301. <https://doi.org/10.1002/ase.115>.
15. Clifton W., Damon A., Nottmeier E., Pichelmann M. Investigation of a three-dimensional printed dynamic cervical spine model for anatomy and physiology education. *Clinical Anatomy*. 2021;1(1):30–39. <https://doi.org/10.1002/ca.23607>.
16. 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. *Zhongguo Yi Liao Qi Xie Za Zhi*. 2019;43(6):451–453. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1671-7104.2019.06.016>.
17. Zhang Y., Zhou J., Guo X. Biomechanical Effect of Different Graft Heights on Adjacent Segment and Graft Segment Following C4/C5 Anterior Cervical Discectomy and Fusion: A Finite Element Analysis. *Med Sci Monit*. 2019;25:4169–4175. <https://doi.org/10.12659/MSM.916629>.
18. Ovsepyan A.L., Smirnov A.A., Pustozero E.A., Mokhov D.E., Mokhova E.S., Trunin E.M. et al. Biomechanical analysis of the cervical spine segment as a method for studying the functional and dynamic anatomy of the human neck. *Ann Anat*. 2022;240:151856. <https://doi.org/10.1016/j.aanat.2021.151856>.
19. 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. *Rus Open Med J*. 2022;11:e0118. <https://doi.org/10.15275/rusomj.2022.0118>.
20. Старчик Д.А., Апопов А.Л. *Атлас распилов человеческого тела*. СПб.: ММЦ; 2020. 172 с.
21. Starchik D.A., Akopov A.L. *Atlas of cuts of the human body: Textbook*. St Petersburg: MMC; 2020. 172 p. (In Russ.)
22. Mitsuhashi N., Fujieda K., Tamura T., Kawamoto S., Takagi T., Okubo K. BodyParts3D: 3D structure database for anatomical concepts. *Nucleic Acids Res*. 2009;37(Database issue):D782–785. <https://doi.org/10.1093/nar/dna008>.
23. Broom N., Thambyah A. Relevant Anatomy and Macro-Level Structure. In: *The Soft-Hard Tissue Junction: Structure, Mechanics and Function*. Cambridge: Cambridge University Press; 2018. pp. 157–177. <https://doi.org/10.1017/9781316481042.007>.
24. Disney C.M., Eckersley A., McConnell J.C., Geng H., Bodey A.J., Hoyland J.A. et al. Synchrotron tomography of intervertebral disc deformation quantified by digital volume correlation reveals microstructural influence on strain patterns. *Acta Biomaterialia*. 2019;92:290–304. <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2019.05.021>.
25. Tavakoli J., Diwan A.D., Tipper J.L. Elastic fibers: The missing key to improve engineering concepts for reconstruction of the Nucleus Pulposus in the intervertebral disc. *Acta Biomaterialia*. 2020;113:407–416. <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2020.06.008>.
26. Wade K.R., Robertson P.A., Broom N.D. On how nucleus-endplate integration is achieved at the fibrillar level in the ovine lumbar disc. *J Anat*. 2012;221(1):39–46. <https://doi.org/10.1111/j.1469-7580.2012.01507.x>.
27. Sharabi M., Levi-Sasson A., Wolfson R., Wade K.R., Galbusera F., Benayahu D. et al. The Mechanical Role of the Radial Fiber Network Within the Annulus Fibrosus of the Lumbar Intervertebral Disc: A Finite Elements Study. *J Biomech Eng*. 2019;141(2):021006. <https://doi.org/10.1115/1.4041769>.
28. Kraft R.H., Fielding R.A., Lister K., Shirley A., Marler T., Merkle A.C. et al. Modeling Skeletal Injuries in Military Scenarios. In: *The Mechanobiology and Mechanophysiology of Military-Related Injuries*. Springer, Cham; 2016. pp. 3–35. https://doi.org/10.1007/978-1-4939-9191-1_1.
29. Dreischarf M., Shirazi-Adl A., Arjmand N., Rohlmann A., Schmidt H. Estimation of loads on human lumbar spine: A review of in vivo and computational model studies. *J Biomech*. 2016;49(6):833–845. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2015.12.038>.
30. Henninger H.B., Reese S.P., Anderson A.E., Weiss J.A. Validation of computational models in biomechanics. *Proc Inst Mech Eng H*. 2010;224(7):801–812. <https://doi.org/10.1243/09544119JHEM649>.
31. Vasavada A.N., Peterson B.W., Delp S.L. Three-dimensional spatial tuning of neck muscle activation in humans. *Exp Brain Res*. 2002;147(4):437–448. <https://doi.org/10.1007/s00221-002-1275-6>.

Вклад авторов:

Концепция статьи и дизайн исследования – **Мохова Е.С., Смирнов А.А., Мохов Д.Е.**

Написание текста – **Мохова Е.С., Яковлев Е.В., Живолупов С.А.**

Сбор и обработка материала – **Мохова Е.С., Яковлев Е.В., Алиев Р.В., Смирнов А.А., Ведяшкина А.С.**

Обзор литературы – **Мохова Е.С., Яковлев Е.В., Бутко Д.Ю., Гасанбеков И.М.**

Перевод на английский язык – **Яковлев Е.В., Смирнов А.А.**

Анализ материала – **Мохова Е.С., Смирнов А.А., Мохов Д.Е., Яковлев Е.В., Живолупов С.А.**

Редактирование – **Яковлев Е.В., Живолупов С.А., Гасанбеков И.М.**

Утверждение окончательного варианта статьи – **Мохова Е.С., Яковлев Е.В.**

Contribution of authors:

Concept of the article and design – **Ekaterina S. Mohova, Alexander A. Sminov, Dmitriy E. Mohov**

Text development – **Ekaterina S. Mohova, Evgeny V. Yakovlev, Sergey A. Zhivolupov**

Collection and processing of material – **Ekaterina S. Mohova, Evgeny V. Yakovlev, Ramiz V. Aliiev, Alexander A. Sminov, Aleksandra S. Vedyashkina**

Literature review – **Ekaterina S. Mohova, Evgeny V. Yakovlev, Dmitriy Y. Butko, Imamudin M. Gasanbekov**

Translation into English – **Evgeny V. Yakovlev, Alexander A. Smirnov**

Material analysis – **Ekaterina S. Mohova, Alexander A. Sminov, Dmitriy E. Mohov, Evgeny V. Yakovlev, Sergey A. Zhivolupov**

Editing – **Evgeny V. Yakovlev, Sergey A. Zhivolupov, Imamudin M. Gasanbekov**

Approval of the final version of the article – **Ekaterina S. Mohova, Evgeny V. Yakovlev**

Информация об авторах:

Мохова Екатерина Степановна, ассистент Института остеопатии, Санкт-Петербургский государственный университет; 199034, Россия, Санкт-Петербург, Университетская наб., д. 7/9; <https://orcid.org/0000-0002-1079-388X>; mokhova-es@mail.ru

Мохов Дмитрий Евгеньевич, д.м.н., профессор, заведующий кафедрой остеопатии, заслуженный врач Российской Федерации, главный внештатный специалист МЗ РФ по остеопатии, президент Российской остеопатической ассоциации, Северо-Западный государственный медицинский университет имени И.И. Мечникова; 191015, Россия, Санкт-Петербург, ул. Кирочная, д. 41; <https://orcid.org/0000-0002-8588-1577>; osteopathie@mail.ru

Яковлев Евгений Васильевич, к.м.н., доцент, заведующий амбулаторно-поликлиническим отделением №2, врач-невролог высшей категории, медицинский центр «Адмиралтейские верфи»; 190121, Россия, Санкт-Петербург, ул. Садовая, д. 126; заведующий кафедрой психофизиологии, Институт прикладного психоанализа и психологии; 199226, Санкт-Петербург, Галерный проезд, д. 3; доцент кафедры медицинской реабилитации и спортивной медицины, Санкт-Петербургский государственный педиатрический медицинский университет; 194100, Россия, Санкт-Петербург, ул. Литовская, д. 2; <https://orcid.org/0000-0002-8435-7562>; vmeda-ev@mail.ru

Живолупов Сергей Анатольевич, д.м.н., профессор, профессор кафедры нервных болезней, Военно-медицинская академия имени С.М. Кирова; 194044, Россия, Санкт-Петербург, ул. Академика Лебедева, д. 6; <https://orcid.org/0000-0003-0363-102X>; peroslava@yandex.ru

Бутко Дмитрий Юрьевич, д.м.н., профессор, заведующий кафедрой медицинской реабилитации и спортивной медицины, Санкт-Петербургский государственный педиатрический медицинский университет; 194100, Россия, Санкт-Петербург, ул. Литовская, д. 2; <https://orcid.org/0000-0001-6284-0943>; prof.butko@mail.ru

Алиев Рамиз Видадиевич, врач-рентгенолог отделения лучевой диагностики, Детский научно-клинический центр инфекционных болезней Федерального медико-биологического агентства; 197022, Россия, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, д. 9; <https://orcid.org/0000-0003-0510-4936>; alihm@mail.ru

Гасанбеков Имамудин Межлумович, ординатор, Российский национальный исследовательский медицинский университет имени Н.И. Пирогова; 117997, Россия, Москва, ул. Островитянова, д. 1; <https://orcid.org/0000-0003-1969-2628>; imam_postuplenie@mail.ru

Ведяшкина Александра Сергеевна, старший преподаватель Института остеопатии, аспирант кафедры остеопатии, Северо-Западный государственный медицинский университет имени И.И. Мечникова; 191015, Россия, Санкт-Петербург, ул. Кирочная, д. 41; <https://orcid.org/0000-0002-8023-7803>; sasha81994@mail.ru

Смирнов Александр Александрович, к.м.н., доцент, заведующий лабораторией биомеханического анализа, Санкт-Петербургский государственный университет; 199034, Россия, Санкт-Петербург, Университетская наб., д. 7/9; <https://orcid.org/0000-0002-2661-3759>; savmeda@yandex.ru

Information about the authors:

Ekaterina S. Mohova, Assistant at the Institute of Osteopathy, St Petersburg State University; 7–9, Universitetskaya Emb., St Petersburg, 199034, Russia; <https://orcid.org/0000-0002-1079-388X>; mokhova-es@mail.ru

Dmitriy E. Mohov, Dr. Sci. (Med.), Professor, Head of the Department of Osteopathy, Honored Doctor of the Russian Federation, Chief Freelance Specialist of the Ministry of Health of the Russian Federation on Osteopathy, President of the Russian Osteopathic Association, North-Western State Medical University named after I.I. Mechnikov; 41, Kirochnaya St., St Petersburg, 191015, Russia; <https://orcid.org/0000-0002-8588-1577>; osteopathie@mail.ru

Evgeny V. Yakovlev, Cand. Sci. (Med.), Associate Professor, Head of Outpatient Department No. 2, Neurologist of the Highest Category, Admiralty Shipyards Medical Center; 126, Sadovaya St., St Petersburg, 190121, Russia; Head of the Department of Psychophysiology, Institute of Applied Psychoanalysis and Psychology; 3, Galerny Passage, St Petersburg, 199226, Russia; Associate Professor of the Department of Medical Rehabilitation and Sports Medicine, St Petersburg State Pediatric Medical University; 2, Litovskaya St., St Petersburg, 194100, Russia; <https://orcid.org/0000-0002-8435-7562>; vmeda-ev@mail.ru

Sergey A. Zhivolupov, Dr. Sci. (Med.), Professor, Professor of the Department of Nervous Diseases, Military Medical Academy named after S.M. Kirov; 6, Akademik Lebedev St., St Petersburg, 194044, Russia; <https://orcid.org/0000-0003-0363-102X>; peroslava@yandex.ru

Dmitriy Y. Butko, Dr. Sci. (Med.), Professor, Head of the Department of Medical Rehabilitation and Sports Medicine, St Petersburg State Pediatric Medical University; 2, Litovskaya St., St Petersburg, 194100, Russia; <https://orcid.org/0000-0001-6284-0943>; prof.butko@mail.ru

Ramiz V. Aliev, Radiologist of the Radiology Department of the Children's Scientific and Clinical Center of Infectious Diseases of the Federal Medical and Biological Agency; 9, Professor Popov St., St Petersburg, 197022, Russia; <https://orcid.org/0000-0003-0510-4936>; alihm@mail.ru

Imamudin M. Gasanbekov, Resident of the Pirogov Russian National Research Medical University; 1, Ostrovityanov St., Moscow, 117997, Russia; <https://orcid.org/0000-0003-1969-2628>; imam_postuplenie@mail.ru

Aleksandra S. Vedyashkina, Senior Lecturer of Institute of Osteopathy, Postgraduate Student of the Department of Osteopathy, North-Western State Medical University named after I.I. Mechnikov; 41, Kirochnaya St., St Petersburg, 191015, Russia; <https://orcid.org/0000-0002-8023-7803>; sasha81994@mail.ru

Alexander A. Smirnov, Cand. Sci. (Med.), Associate Professor, Head of the Laboratory of Biomechanical Analysis, St Petersburg State University; 7–9, Universitetskaya Emb., St Petersburg, 199034, Russia; <https://orcid.org/0000-0002-2661-3759>; savmeda@yandex.ru