Дата публикации: 01.03.2025
DOI: 10.24412/2588-0500-2025_09_01_2
УДК 612.172.6

Publication date: 01.03.2025
DOI: 10.24412/2588-0500-2025_09_01_2
UDC 612.172.6

ФИЗИОЛОГИЯ ЦИКЛИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ КОРНЯ АОРТЫ

Т.Н. Василькова, В.В. Колпаков, Ю.А. Маслакова, Т.А. Веснина, А.И. Березенцева
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тюменский государственный медицинский университет» Министерства здравоохранения Российской Федерации, г. Тюмень, Россия

Аннотация. Анатомические структуры корня аорты достаточно хорошо изучены, однако по сей день нет четкого понимания о физиологии его работы, а именно циклическом изменении его формы и размеров. Данные физиологические деформации играют важную роль в оптимизации сердечного выброса. Современные исследования идут по пути изучения гемодинамики с использованием рентгеноконтрастных меток, с применением пульс-дупликатора, но наиболее ценными являются функциональные методы диагностики у пациентов, перенесших различные вмешательства на корне аорты. Показано, что наиболее анатомичные вмешательства ассоциируются с наилучшим исходом для пациента с точки зрения ремоделирования камер сердца и показателей центральной гемодинамики.
Ключевые слова: аортальный клапан, корень аорты, гемодинамика, ремоделирование, циклическая деформация.

PHYSIOLOGY OF AORTIC ROOT CYCLIC DEFORMATION

T.N. Vasil’kova, V.V. Kolpakov, Yu.A. Maslakova, T.A. Vesnina, A.I. Berezentseva
Tyumen State Medical University, Tyumen, Russia

Abstract. The anatomical structures of the aortic root are fairly well understood, but to this day there is no clear understanding of its physiology, namely, the cyclic changes in its shape and size. These physiological deformations play an important role in optimizing cardiac output. Modern studies are on the way to study hemodynamics with the use of X-ray contrast marks, with the use of pulse duplicator, but the most valuable are functional diagnostic methods in patients who have undergone various interventions on the aortic root. It is shown that the most anatomic interventions are associated with the best patient outcome in terms of cardiac chamber remodeling and central hemodynamic parameters.
Keywords: aortic valve, aortic root, hemodynamics, remodeling, cyclic deformation.

Введение. Кадаверная анатомия клапанов сердца давно изучена, проведены масштабные исследования по изучению взаимосвязей различных анатомических размеров аортального клапана с ростом, возрастом и прочими антропометрическими характеристиками. Имеется большое количество регрессионных формул, описывающих аортальный клапан – пожалуй, самый главный клапан в сердце [1, 2].

Аортальный клапан анатомически занимает центральное положение в основании сердца, а с точки зрения гемодинамики играет наиболее значимую роль в перфузии всех органов, включая само сердце. Показано, что именно аортальные пороки раньше всего приводят к серьезным гемодинамическим проблемам [3].

В частности, при аортальном стенозе чаще всего наблюдается грубое гемодинамическое осложнение, характеризующееся лимитированным сердечным выбросом [4]. Вне зависимости от усилия миокарда по изгнанию крови из левого желудочка в условиях увеличения потребности в гемоперфузии, минутный объем крови оказывается ограниченным трансклапанной пропускной способностью, что приводит к так называемому «синдрому лимитированного сердечного выброса», главной характеристикой которого являются синкопальные состояния (так называемый синдром Морганьи-Адамса-Стокса). Даже здоровый миокард левого желудочка, обладающий большими резервными возможностями, не может наращивать минутный объем крови, что приводит к транзиторной ишемии головного мозга, чаще всего при физической нагрузке [5].

И, наоборот, недостаточность аортального клапана также приводит к тяжелым изменениям, сказывающимся как на

системной гемодинамике, так и на состоянии камер сердца. В условиях регургитации по закону Франка-Старлинга значительно возрастает преднагрузка растяжением, то есть в условиях большего растяжения наращивается сила сокращения миокарда, что приводит к грубой перестройке центральной гемодинамики, нарушению рецептильности каротидного гломуса и высокой систолической гипертензии, купирование которой может оказаться фатальным [6].

Несмотря на высокую распространенность аортального порока, а также большой клинический опыт ведения подобных больных, до сих пор нет «идеального способа замены нативного аортального клапана» [7]. Связано это именно с отсутствием понимания важнейших физиологических компонентов запирательной работы нативного клапана [8].

Наиболее распространенный способ замены аортального клапана – это его протезирование. Операция может выполняться как в редакции с имплантацией протеза на место клапана (в аортальную позицию), так и в редакции с полной заменой всех экстракардиальных структур корня аорты [9]. Данные способы используются до сих пор, однако, уже сейчас понятно, что они не являются физиологичными с точки зрения гемодинамики (не учитывая необходимость в пожизненной антикоагуляции и высокий риск инфекционного протезного эндокардита) [10].

Современные механические протезы клапанов сердца обладают слишком высоким трансклапанным градиентом, который значительно выше физиологического. У многих из них нет центрального потока, что приводит к резкому снижению эффективности насосной функции и появлению проблемы механического гемолиза, турбулентности и так далее. Биологические протезы клапанов сердца имеют гемодинамические преимущества, однако в корне далеки от физиологии нативного клапана. Наличие каркаса в них значительно ускоряет имплантацию и делает операцию стандартизированной, однако значительно нарушает естественную деформабельность корня аорты, что приводит к патологическому ремоделированию миокарда левого желудочка даже после хирургического лечения аортального порока, мало того, значительно снижает эффективность сердечного выброса за счет нефизиологично малой площади открытия (эффективная площадь открытия аортального клапана), а также довольно больших потерь энергии на открытии (в свою очередь нативный аортальный клапан имеет свойство открываться даже при отсутствии трансклапанного градиента, то есть в условиях изометрии давления в аорте и левом желудочке) [11].

Отсюда актуальность работы – (1) доклад об особенностях работы аортального клапана (в узком смысле) и работы всего корня аорты поможет понять, каких принципов следует придерживаться при операциях на корне аорты, (2) критическая оценка экспериментальных и клинических исследований физиологии корня аорты позволит акцентировать внимание на нерешенных фундаментальных проблемах клапанной гемодинамики, (3) отмеченная ценность сохранения геометрии и физиологии корня аорты при оперативных вмешательствах в клинике вызовет интерес к реконструктивным вмешательствам (где это возможно) и максимально анатомичной замене структур корня аорты (неокуспидизация, использование человеческих аллографтов и прочее).

Цель работы – критический анализ фундаментальных и клинических исследований, посвященных нормальной и патологической физиологии корня аорты.

Методы и организация исследования. Источником научной литературы для данного обзора явились периодические издания, материалы конференций, кандидатские и докторские диссертации, монографии и прочие материалы, найденные в том числе с использованием базы данных PubMed по запросам: «Aortic valve», «Aortic root», «Hemodinamics of aortic valve» и прочим. В ходе изучения научной литературы применялись методы анализа, синтеза, обобщения и систематизации.

Результаты исследования и их обсуждение. В процессе анализа литературных источников, где освещаются как фундаментальные исследования, так и клинические результаты оперативных вмешательств в анатомию корня аорты с целью восстановления запирательной функции, было обнаружено не так много качественных исследований.

Наиболее часто встречается описание методов рентгеноскопии и функционального исследования, также есть исследования по контролю за изменением системного давления прямым методом и прочими.

Стоит отметить, что в условиях недостатка информации ряд необъяснимых феноменов могут быть интерпретированы с точки зрения эволюционно-генетической позиции. Многие процессы несмотря на отсутствие объяснения могут смело считаться оптимальными в связи с направленностью эволюционного процесса на создание наиболее оптимальной и жизнеспособной физиологии.

Рассматривая отдельные, критически важные вопросы анатомии аортального клапана и корня аорты необходимо отметить, что в терминологии структур корня аорты присутствует некоторая путаница. Например, у большинства хирургов нет понятия о многосоставном строении корня аорты. Понятие «аортальное кольцо» или «фиброзное кольцо» в корне неверно и мешает пониманию физиологии аортального клапана [12].

В данной работе мы откажемся от термина «фиброзное кольцо аортального клапана» в пользу терминов «вентрикулоартериальное соединение», «синотубулярное соединение», «линия прикрепления створок аортального клапана».

Стоит отметить, что линия прикрепления створок аортального клапана имеет объемную структуру коронообразной формы и находится в самом основании синусов Вальсальвы, мало того, в самой глубокой части переходит на миокард левого желудочка, пересекая вентрикулоартериальное соединение (так называемые «точки надиров») (рис. 1).



Рис. 1. В условиях WetLab показана объемная анатомия линии прикрепления створок аортального клапана. Синусы Вальсальвы иссечены

Анатомо-физиологическое строение аортального клапана обусловлено рядом выполняемых им функций. Данная анатомия, а именно относительно большой периметр фигуры линии прикрепления створок аортального клапана, обеспечивает высокую вариабельность открытия аортального клапана [13]. Именно из-за того, что аортальный клапан имеет не «фиброзное кольцо», а «корону», перед началом сокращения происходит аксиальное смещение корня аорты, что приводит с одной стороны к «расплющиванию» линии прикрепления створок, а с другой стороны – к открыванию створок без градиента давления, о чем писал Р.М. Муратов – аортальный клапан способен открываться без давления на открытие.

В одном из исследований циклическая деформация корня аорты изучалась «методом меток». Рентгенконтрастные имплантаты помещались в области комиссур, надиров и синусов Вальсальвы (рис. 2) [14]. По результату исследования было показано, что корень аорты является крайне динамичной структурой. Систолодиастолическая площадь на уровне вентрикуло-аортального соединения колеблется до 50% от его площади.

Мало того, значительно изменяется угол между параболой прикрепления каждой из створок и выводным отделом левого желудочка. Это поворачивает створку таким образом, что вектор давления на открытие действует на створку почти под прямым углом, что значительно облегчает ее открытие.

Деформация корня аорты связана с влиянием близлежащих структур. Очевидно, что центральное положение корня аорты неслучайно. Sud A. и коллеги продемонстрировали наиболее значимые структуры, окружающие аортальный клапан со всех сторон (рис. 3) [15].

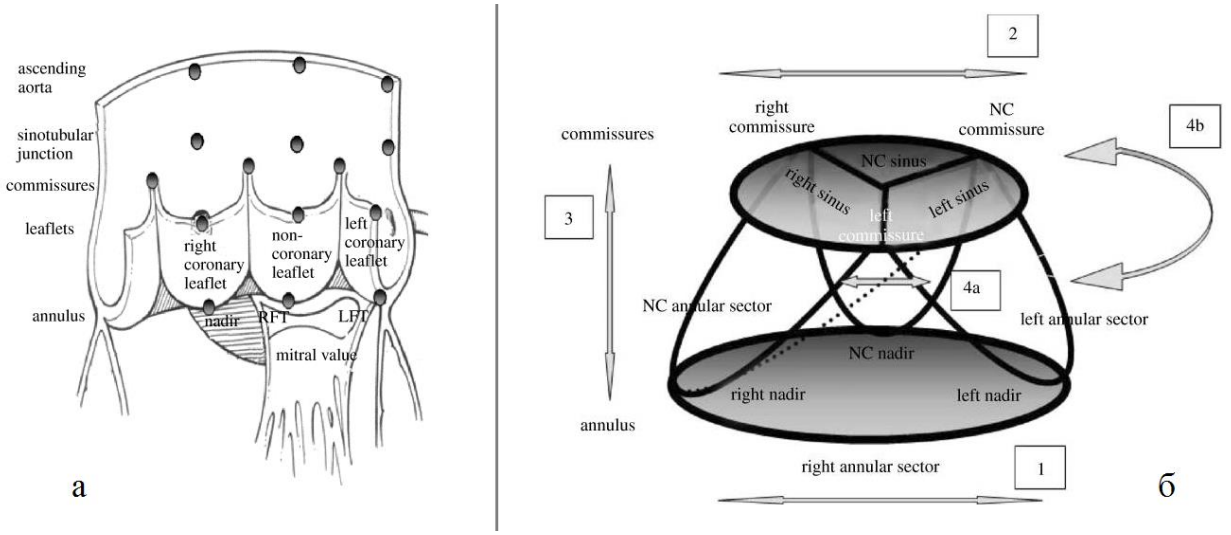


Рис. 2. Способ исследования деформации корня аорты in vivo по Cheng A.
а – расстановка меток в корне аорты, б – результаты наблюдений

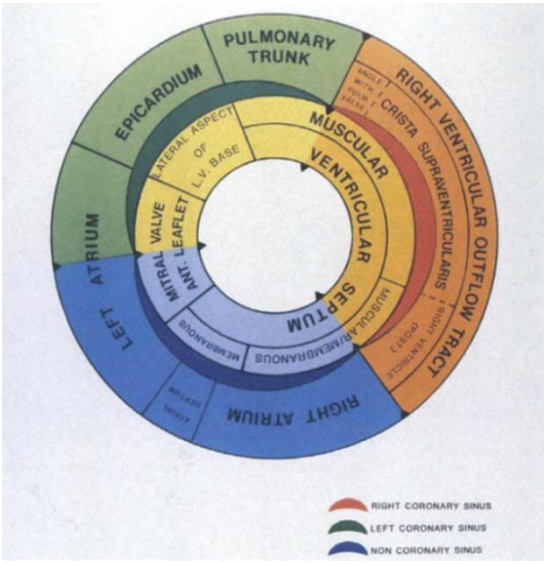


Рис. 3. Схема структур, окружающих аортальный клапан (Sud A.)

В настоящее время не так много работ по моделированию влияния движения окружающих структур на работу клапана. Однако есть ряд лучевых исследований потока, в соответствии с которым можно сделать ряд выводов.

Во-первых, расширение синусов Вальсальвы обеспечивает достаточное

отклонение створок вплоть до почти полного проваливания и достижения диаметра аорты в восходящей части с нивелированием разницы размеров синусной и артериальной части в синотубулярном соединении [16].

Во-вторых, показано, что внешняя компрессия корня аорты создает условия для оптимального закрытия створок. При этом не наблюдается ретроградного коронарного потока, а, наоборот, перфузия коронарных артерий достигает пика [17].

Эффективность кореньсохраняющих и кореньвыносящих операций можно оценить, опираясь на сравнительный анализ клинических результатов. Роль циклической деформации наглядно демонстрируется при сравнении гемодинамических результатов операций с сохранением корня аорты и без сохранения. Предложено несколько вариантов сохранения нативной анатомии и упругости корня аорты: методики David, Yacoub и прочие [18].

В сравнении с кореньвыносящей операцией гемодинамика при сохранении геометрии корня аорты значительно лучше, что выражается в отсутствии патологического ремоделирования камер сердца, в отсутствии снижения объемного потока через аортальный клапан, в нативной гемодинамике. Таким образом, сохранение геометрии корня аорты и его упругости оказывается критически важным в обеспечении оптимальной гемодинамики.

В связи с этим крайне актуально и дальше изучать данный вопрос и решать проблемы протезирования аортального клапана без потери его нормальной физиологии.

Методы моделирования позволят найти предикторы сохранения трансклапанного градиента на наиболее низком уровне, что решит проблему замены клапана, однако, пока наилучшим вмешательством в клапанной хирургии является реконструкция – сложная и трудно воспроизводимая реконструкция коронообразной анатомии прикрепления створок, имитация синусов Вальсальвы, сохранение надиров и так далее (рис. 4).

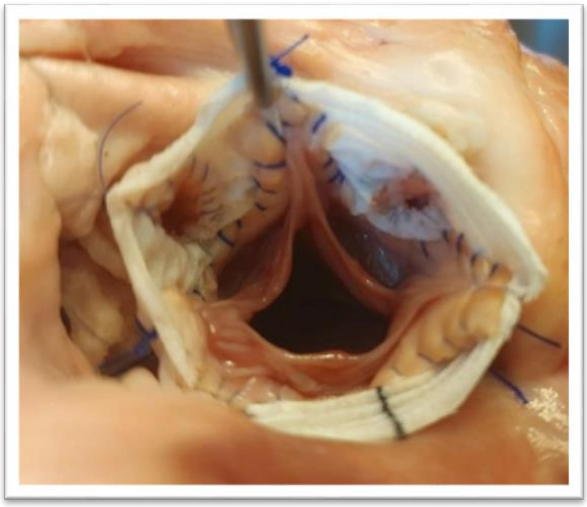


Рис. 4. Способ восстановления анатомии корня аорты с сохранением оптимальной гемодинамики, выполненный нами по методике David.

Заключение. В настоящее время накоплено не так много фундаментальных исследований, касающихся изучения гемодинамики аортального клапана. Это может быть связано со сложностью исследования in vivo, необходимостью точных визуализирующих методик, а не оператор-зависимого результата (как в случае с эхокардиоскопией).

Вместе с этим, с точки зрения эволюционного подхода к проблеме, вполне понятно, что центральное положение корня аорты в организме человека неслучайно, а его упруго-эластические взаимодействия с близлежащими структурами обеспечивают оптимальную гемодинамику корня аорты, чего не наблюдается при имплантации каркасных протезов клапанов сердца.

Корень аорты является динамической структурой, подвергающейся циклической деформации во время сердечного цикла.

Ротационные, аксиальные и прочие векторы деформации обеспечиваются благодаря особой упругости восходящего отдела аорты. Упругие свойства обеспечиваются особенностью эмбриогенеза – в отличие от большей части аорты восходящий отдел формируется из нервного гребня, а не из брюшной эмбриональной аорты.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Благодарности. Авторы выражают благодарность научному отделу, виварию и гистологической лаборатории ФГБОУ ВО РязГМУ Минздрава России за активное содействие исследованию.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Acknowledgements. The authors express their gratitude to the Scientific Department, Vivarium and Histology Laboratory of the Ryazan State Medical University for actively contributing to the study.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Geometry of homograft valve leaflets – effect of dilation of the aorta and the aortic root / K.J. Lockie, M. Butterfield, J. Fisher [et al] // Ann. Thorac. Surg. – 1993. – № 56. – P. 125–130.
2. Time-resolved 3-dimensional velocity mapping in the thoracic aorta–visualization of 3-directional blood flow patterns in healthy volunteers and patients / M. Markl, M.T. Draney, M.D. Hope [et al] // J. Comput. Assist.Tomogr. – 2004. – № 28. – P 459–468. DOI: 10.1097/00004728-200407000-00005.
3. Dynamic aortic root–it's role in aortic-valve function / R.J. Brewer, J.D. Deck, B. Capati, S.P. Nolan // J. Thorac. Cardiovasc. Surg. – 1976. – № 72. – P. 413–417.
4. An approach to the simulation of fluid–structure interaction in the aortic valve / C.J. Carmody, G. Burriesci, I.C. Howard, E.A. Patterson // J. Biomech. – 2004. – № 39. – P. 158–169. DOI: 10.1016/j.jbiomech.2004.10.038.
5. Helical and retrograde secondary flow patterns in the aortic-arch studied by directional magnetic-resonance velocity mapping / P.J. Kilner, G.Z. Yang, R.H. Mohiaddin [et al] // Circulation. – 1993. – № 88. – P. 2235–2247.
6. A four-dimensional study of the aortic root dynamics / E. Lansac, H.S. Lim, Y. Shomura [et al] // Eur.J. Cardiothorac. – 2002. – № 22. – P. 497–503. DOI: 10.1016/S1010-7940(02)00405-0.
7. Протезирование трикуспидального клапана митральным гомографтом: техника операции и непосредственные результаты / Р.Н. Комаров, М.Д. Нуждин, А.О. Симонян [и др.] // Кардиология и сердечно-сосудистая хирургия. – 2023. – Т. 16. – № 4. – С. 443–448. DOI: 10.17116/kardio 202316041443. [In English] Komarov R.N., Nuzhdin M.D., Simonyan A.O., Drakina O.V., Tsaregorodtsev A.V. Tricuspid valve replacement with a mitral homograft: surgical technique and immediate results. *Russian Journal of Cardiology and Cardiovascular Surgery*, 2023, no. 16(4), pp. 443–448. DOI: 10.17116/kardio202316041443 (in Russ.)
8. Henderson, Y. Two modes of closure of the heart valves. Heart 4 / Y. Henderson, F.E. Johnson. – 1912. – P. 69–82.
9. Mini-invasive transmitral myectomy and mitral valve replacement in obstructive hypertrophic cardiomyopathy case / I.D. Zemlyannikov, A.V. Tsaregorodtsev, H.N. Nguyen [et al] // Extreme Medicine. – 2023. – № 2. – P. 105. DOI: 10.47183/mes.2023.012.
10.Технические аспекты и результаты применения клапанных гомографов в хирургии атриовентрикулярных клапанов сердца: систематический обзор / М. Нуждин, Р. Комаров, Д. Мацуганов [и др.] // Патология кровообращения и кардиохирургия. – 2023. –№ 27 (2). – С. 42–53. [In English] Nuzhdin M., Komarov R., Matsuganov D., Melnikov I., Tsaregorodtsev A. Technical aspects and results of valve homographs in atrioventricular heart valve surgery: a systematic review. *Circulatory Pathology and Cardiac Surgery*, 2023, no. 27(2), pp. 42–53. DOI: 10.21688/1681-3472-2023-2-42-53. (in Russ.)
11.Mitral homograft in tricuspid position: indications for implantation and surgical technique / R.N. Komarov, M.D. Nuzhdin, V.A. Belov [et al] // Complex Issues of Cardiovascular Diseases. – 2023. – № 12(2). – P. 173–182. DOI: 10.17802/2306-1278-2023-12-2-173-182.
12.Asymmetric redirection of flow through the heart / P.J. Kilner, G.Z. Yang, A.J. Wilkes, R.H. Mohiaddin, D.N. Firmin, M.H. Yacoub // Nature. – 2000. – № 404. – P. 759–761. DOI: 10.1038/35008075.
13.Stress-sharing between sinuses and leaflets of the aortic-valve / M.J. Thubrikar, S.P. Nolan, J. Aouad, J.D. Deck // Surg. Forum. – 1984. – № 35. – P. 250–252.

14.Cheng, A. Aortic root dynamics and surgery: from craft to science / A. Cheng, P. Dagum, D.C. Miller // Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci. – 2007. – Vol. 362 (1484). – P. 1407. DOI: 10.1098/rstb.2007.2124.
15.Sud, A. Anatomy of the Aortic Root / A. Sud, F. Parker, D. Magilligan // The Annals of Thoracic Surgery. – 1984. – № 38 (1). – P. 76–79. DOI: 10.1016/S0003- 4975(10)62195-9.
16.The aortic outflow and root: a tale of dynamism and crosstalk / M.H. Yacoub, P.J. Kilner, E.J. Birks, M. Misfeld // The Annals of Thoracic Surgery. – 1999. – № 68 (3). – P. 37–43. DOI: 10.1016/s0003-4975(99)00745-6.
17.Innervation of human atrioventricular and arterial valves / K. Maron, M.H. Yacoub, J.M. Polak [et al.] // Circulation. – 1996. – № 94. – P. 368–375.
18.David, T.E. An aortic valve-sparing operation for patients with aortic incompetence and aneurysm of the ascending aorta / T.E. David, C.M. Feindel // J Thorac Cardiovasc Surg. – 1992. – № 103 (4). – P. 617. DOI: 10.1016/s0022-5223(19)34942-6.
19.Клинико-функциональные параметры кардиоваскулярной системы у больных артериальной гипертензией в зависимости от типа распределения жировой ткани / Т.Н. Василькова, Т.Б. Баклаева, Г.А. Василькова [и др.] // Медицинская наука и образование Урала. – 2022. – Т. 23. – № 2 (110). – С. 7–11. [In English] Vasilkova T.N., Baklaeva T.B., Vasilkova G.A. et al. Clinical and functional parameters of the cardiovascular system in patients with arterial hypertension depending on the type of adipose tissue distribution. *Medical Science and Education of the Urals*, 2022, vol. 23, no. 2 (110), pp. 7–11. DOI: 10.36361/18148999_2022_23_2_7 (in Russ.).
20.Модифицированная техника экзопротезирования корня и восходящего отдела аорты по методике Florida Sleeve / А.В. Лысенко, Г.И. Салагаев, П.В. Леднев [и др.] // Кардиология и сердечно-сосудистая хирургия. – 2023. – Т. 16. – № 1. – С. 118–120. [In English] Lysenko A.V., Salagaev G.I., Lednev P.V. et al. Modified technique of exoprosthetic replacement of the aortic root and ascending aorta using Florida Sleeve technique. *Cardiology and Cardiovascular Surgery*, 2023, vol. 16, no. 1, pp. 118–120. DOI 10.17116/kardio202316011118 (In Russ.).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Татьяна Николаевна Василькова – доктор медицинских наук, профессор, ФГБОУ ВО Тюменский ГМУ Минздрава России, Тюмень, e-mail: vasilkova@tyumsmu.ru.
Виктор Васильевич Колпаков – доктор медицинских наук, профессор, ФГБОУ ВО Тюменский ГМУ Минздрава России, Тюмень, e-mail: kolpakov661@rambler.ru.
Юлия Александровна Маслакова – кандидат медицинских наук, доцент кафедры нормальной физиологии, ФГБОУ ВО Тюменский ГМУ Минздрава России, Тюмень, e-mail: doctorulia555@mail.ru.
Татьяна Анатольевна Веснина – старший преподаватель кафедры нормальной физиологии, ФГБОУ ВО Тюменский ГМУ Минздрава России, Тюмень, e-mail: rossa600@mail.ru
Анна Ивановна Березенцева – кандидат педагогических наук, доцент кафедры нормальной физиологии, ФГБОУ ВО Тюменский ГМУ Минздрава России, Тюмень, e-mail: bereza-psy@yandex.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:

Tat'yana N. Vasilkova – Doctor of Medical Sciences, Professor, Tyumen State Medical University, Tyumen, Russia, e-mail: vasilkova@tyumsmu.ru.
Viktor V. Kolpakov – Doctor of Medical Sciences, Professor, Tyumen State Medical University, Tyumen, Russia, e-mail: kolpakov661@rambler.ru.
Yulia A. Maslakova – Candidate of Medical Sciences, Associate Professor of the Department of Normal Physiology, Tyumen State Medical University, Tyumen, Russia, e-mail: doctorulia555@mail.ru.
Tat'yana A. Vesnina – Senior Lecturer of the Department of Normal Physiology, Tyumen State Medical University, Tyumen, Russia, e-mail: rossa600@mail.ru.
Anna I. Berezentseva – Candidate of Pedagogical Sciences, Associate Professor of the Department of Normal Physiology, Tyumen State Medical University, Tyumen, e-mail: bereza-psy@yandex.ru.

Для цитирования: Физиология циклической деформации корня аорты / Т.Н. Василькова, В.В. Колпаков, Ю.А. Маслакова [и др.] // Современные вопросы биомедицины. – 2025. – Т. 9. – № 1(31). DOI: 10.24412/2588-0500-2025_09_01_2

For citation: Vasil'kova T.N., Kolpakov V.V., Maslakova Yu.A., Vesnina T.A., Berezentseva A.I. Physiology of aortic root cyclic deformation. *Modern Issues of Biomedicine*, 2025, vol. 9, no. 1(31). DOI: 10.24412/2588-0500-2025_09_01_2