

ВЫСОКОТОЧНАЯ КОМПЬЮТЕРНАЯ СЕГМЕНТАЦИЯ АОРТАЛЬНОГО КЛАПАНА И КОРНЯ АОРТЫ

Филиппов А. А., Успенский В. Е., Карев Е. А., Квиндт П. А.,
Пищугин А. С., Малашичева А. Б., Толпыгин Д. С.,
Моисеева О. М., Гордеев М. Л.

Федеральное государственное бюджетное учреждение
«Национальный медицинский исследовательский центр имени
В. А. Алмазова» Министерства здравоохранения Российской
Федерации, Санкт-Петербург, Россия

Контактная информация:

Успенский Владимир Евгеньевич,
ФГБУ «НМИЦ им. В. А. Алмазова»
Минздрава России,
ул. Аккуратова, д. 2, Санкт-Петербург,
Россия, 197341.
E-mail: uspenskiyv@yahoo.com

Статья поступила в редакцию 07.01.2022
и принята к печати 19.04.2022.

Резюме

Актуальность. Клапаносберегающее протезирование корня аорты с реимплантацией аортального клапана — активно развивающийся метод лечения аневризмы восходящей аорты. Улучшение результатов этого метода неразрывно связано с пониманием связей исходных функциональных и планиметрических характеристик клапанно-аортального комплекса, технических аспектов процедуры реимплантации и полученных результатов. **Цель.** Поиск и анализ ранее малоизученных факторов — планиметрических характеристик аортального клапана и корня аорты. **Материалы и методы.** Высокоточная оценка планиметрии аортальных створок требует прецизионных методов визуализации и последующих построений виртуальных трехмерных реконструкций. Создание высокоточных реконструкций стало возможно благодаря внедрению в клиническую практику специализированных сред автоматизированного проектирования. В связи с технической сложностью ни один из известных методов ранее не использовался для точного измерения всех структур корня аорты у большой группы пациентов. Нерешенными задачами остаются упрощение, ускорение построения реконструкции, а также масштабирование этой методики. **Результаты.** Основным итогом данной работы стало создание алгоритма сегментации корня аорты и построения высокоточной трехмерной реконструкции аортального клапана, а также практическая реализация алгоритма определения основных его планиметрических параметров с возможностью масштабирования на большую группу пациентов. **Заключение.** Метод позволяет построить высокоточную трехмерную реконструкцию внутренних структур корня аорты в течение нескольких часов и представляет ценность как для определения тактики и технических особенностей оперативного лечения пациента, так и для изучения влияния анатомии корня аорты на развитие рецидива аортальной недостаточности после клапаносберегающей операции.

Ключевые слова: автоматизированное проектирование, алгоритмы, аневризма грудной аорты, аортальный клапан, недостаточность аортального клапана, реимплантация, трехмерная визуализация.

Для цитирования: Филиппов А.А., Успенский В.Е., Карев Е.А., Квиндт П.А., Пищугин А.С., Малашичева А.Б., Толпыгин Д.С., Моисеева О.М., Гордеев М.Л. Высокоточная компьютерная сегментация аортального клапана и корня аорты. Трансляционная медицина. 2022;9(2):81-94. DOI: 10.18705/2311-4495-2022-9-2-81-94

HIGH-PRECISION COMPUTER SEGMENTATION OF THE AORTIC VALVE AND AORTIC ROOT

Alexey A. Filippov, Vladimir E. Uspenskiy, Egor A. Karev, Pavel A. Kvindt, Alexander S. Pishchugin, Anna B. Malashicheva, Dmitry S. Tolpygin, Olga M. Moiseeva, Mikhail L. Gordeev

Almazov National Medical Research Centre, Saint Petersburg, Russia

Corresponding author:

Vladimir E. Uspenskiy, Almazov National Medical Research Centre, Akkuratova str., 2, Saint Petersburg, Russia, 197341.

E-mail: uspenskiyv@yahoo.com

Received 07 January 2022; accepted 19 April 2022.

Abstract

Background. Valve-sparing aortic root replacement with aortic valve reimplantation is a rapidly developing method of treatment of ascending aortic aneurysm. The improvement of the results of this method is inextricably linked with the understanding of the relationships between the initial functional and planimetric characteristics of the valvular-aortic complex, the technical aspects of the reimplantation procedure and the results obtained. **Objective.** To search and analyze previously little-studied factors — the planimetric characteristics of the aortic valve and the aortic root. **Design and methods.** High-precision assessment of the planimetry of the aortic flaps requires precision visualization methods and subsequent creation of virtual three-dimensional models. The creation of high-precision reconstructions became possible due to the introduction of specialized computer-aided design environments into clinical practice. Due to the technical complexity, none of the known methods has previously been used to accurately measure all the structures of the aortic root in a large group of patients. Simplification, acceleration of reconstruction construction, as well as scaling of this technique remain unresolved tasks. **Results.** The main result of this work is the development of an algorithm of segmentation of the aortic root and the construction of a high-precision three-dimensional model of the aortic valve, as well as the practical implementation of an algorithm for determining main planimetric parameters of the aortic root with the possibility of scaling to a large group of patients. **Conclusion.** The method makes it possible to construct a high-precision three-dimensional reconstruction of the internal structures of the aortic root within a few hours and is valuable both for determining the tactics and technical features of surgical treatment of the patient, and for studying the effect of the anatomy of the aortic root on the development of recurrence of aortic insufficiency after valve-sparing surgery.

Key words: algorithms, aortic aneurysm, aortic valve, aortic valve insufficiency, computed-aided design, reimplantation, thoracic, three-dimensional imaging.

*For citation: Filippov AA, Uspenskiy VE, Karev EA, Kvindt PA, Pishchugin AS, Malashicheva AB, Tolpygin DS, Moiseeva OM, Gordeev ML. High-precision computer segmentation of the aortic valve and aortic root. *Translyatsionnaya meditsina=Translational Medicine*. 2022;9(2):81-94. (In Russ.) DOI: 10.18705/2311-4495-2022-9-2-81-94*

Список сокращений: АВА — аневризма восходящей аорты, АК — аортальный клапан, АН — аортальная недостаточность, ВА — восходящая аорта, ВТЛЖ — выходной тракт левого желудочка, ВТР — виртуальная трехмерная реконструкция, ПО — программное обеспечение, РКТА —

рентгеновская компьютерно-томографическая ангиография, САПР — среды автоматизированного проектирования, СВ — синусы Вальсальвы, СТС — синотубулярное соединение, ФК — фиброзное кольцо, ЭхоКГ — эхокардиография.

Введение

Клапаносохраняющая хирургия аневризмы корня аорты

Аневризма восходящей аорты (АВА) — заболевание, сочетающее в себе малозначимые клинические проявления и высокий риск развития тяжелых, инвалидизирующих и, зачастую, фатальных осложнений — расслоения и разрыва аорты. По данным разных авторов, ежегодно вновь выявляется 60–100 случаев аневризмы грудной аорты на 1 млн населения, причем отмечается прогрессирующий рост заболеваемости [1–3]. Главной задачей хирургического лечения аневризмы аорты является предотвращение ее расслоения и/или разрыва. Показания к хирургической коррекции складываются из значения максимального диаметра восходящей аорты (ВА) и дополнительных факторов: наличия тяжелой аортальной недостаточности (АН), тяжелой митральной недостаточности, признаков дисплазии соединительной ткани, подтвержденных мутаций генов *TGFBR1/R2*, а также других факторов риска неблагоприятных событий, ассоциированных с аортой (неконтролируемая артериальная гипертензия, скорость расширения аорты $> 3,0$ мм/год, семейный анамнез аневризм, расслоений аорты и/или внезапных смертей, личный анамнез расслоений любых артерий, планируемая беременность) [4, 5]. В случае локализации аневризматического расширения ВА в ее проксимальной части (зона синусов Вальсальвы (СВ)) в патологический процесс неизбежно вовлекается аортальный клапан (АК), и вмешательство на последнем становится неизбежным компонентом операции протезирования корня аорты [6]. Исторически «золотым стандартом» хирургии корня аорты является операция Bentall-De Bono, заключающаяся в замещении АК, зоны синусов Вальсальвы и прилегающей тубулярной части ВА комбинированным протезом аорты (кондуитом) с закрепленным на нем протезом АК и реимплантации устьев коронарных артерий [7]. Этот метод относительно несложен, накоплен большой опыт его применения, непосредственные и отдаленные результаты хороши [8, 9]. Отрицательными аспектами клапаноуносящих вмешательств, подразумевающих замещение нативного АК механическим протезом, являются необходимость пожизненного приема антикоагулянтов (и, соответственно, постоянного мониторинга показателей свертывающей системы крови), риски тромбозмболических и геморрагических осложнений, вероятность развития септического эндокардита протезированного клапана, существенные ограничения при планировании беременности. Нельзя забывать о риске пациент-протезного несо-

ответствия и необходимости подбора протеза с эффективной площадью открытия, соответствующей конкретному пациенту [10]. В случае использования кондуита с биологическим протезом АК, а также при имплантации других заместителей корня аорты, не имеющих в своем составе механических протезов (протезирование корня аорты гомографтом, операция Ross, операция Ozaki), постоянный прием антикоагулянтов не требуется, однако срок функционирования биопротезов ограничен, имеется риск повторных вмешательств вследствие дегенерации, нарушения функции или аневризматического расширения заместителя [11–14]. Отсутствие оптимального искусственного заместителя корня аорты побудило направить усилия в сторону разработки методик протезирования зоны синусов Вальсальвы с сохранением аортальных створок. Клапаносберегающее вмешательство возможно при наличии неизмененных (мягких, нефиброзированных и некальцинированных) створок и предпочтительно трехстворчатого АК. Оптимальными кандидатами для подобного метода лечения являются больные с АН первого (расширение корня аорты в сочетании с морфологически нормальными створками) и второго (пролапс створок) типов [15, 16]. Одним из давно изучаемых и часто применяющихся видов клапаносберегающего протезирования корня аорты является операция David [17]. Суть операции David заключается в полном иссечении СВ, выкраивании створок АК на комиссурах и замещении корня аорты сосудистым протезом от уровня выходного тракта левого желудочка (ВТЛЖ); створки при этом фиксируются внутри протеза. Отличительной чертой этого подхода является стабилизация корня аорты на всех уровнях — фиброзного кольца (ФК) АК, синусов Вальсальвы, синотубулярного соединения (СТС). Клапаносохраняющая коррекция АН ассоциирована с весьма позитивными результатами, так, в исследовании Price J. и соавторов (2013) 30-дневная летальность составила 0,8 %, а ежегодные уровни тромбозмболических, геморрагических осложнений и эндокардита 1,1 %, 0,23 % и 0,19 %, соответственно [18]. Операция David лишена недостатков традиционных клапаноуносящих методик, однако она технически существенно сложнее, сопряжена с большей длительностью искусственного кровообращения, анемии миокарда, а также риском рецидива АН [19–22]. Известно несколько неблагоприятных обстоятельств, повышающих вероятность рецидива АН после клапаносохраняющей коррекции: реимплантация двустворчатого АК, дополнительные вмешательства на створках клапана, расположение точки коаптации створок АК сразу

после коррекции ниже уровня ФК АК, однако даже при исключении насколько возможно большего числа этих факторов, прогнозирование длительности нормального функционирования реимплантированного АК представляет непростую задачу [23, 24]. До настоящего времени одним из важнейших критериев выбора размера протеза, расположения створок на этапе их реимплантации, необходимости и вида дополнительных манипуляций на аортальных створках остается фактор, плохо поддающийся изучению и стандартизации, — опыт конкретного хирурга. Улучшение понимания связей исходных функциональных и планиметрических характеристик клапанно-аортального комплекса, технических аспектов процедуры реимплантации АК и полученных результатов ставит задачу выявления ранее не изученных объективных факторов, после установления которых мы сможем прогнозировать результат клапаносберегающей процедуры, улучшить ее стандартизацию, воспроизводимость комплексной процедуры силами «среднего» хирурга и путем воздействий на эти факторы улучшить результаты операций.

Патогенез аортальной недостаточности при аневризме корня аорты

Корень аорты представляет собой сочетание жестких фиброзных (стержневых) и эластичных

оболочечных структур. Первые включают в себя ФК АК, арочные дуги, комиссуральные стержни, обеспечивающие поддержание формы и механическую прочность. В группу вторых входят СВ, створки АК, которые являются демпферами гемодинамических нагрузок (Almoosawy 2020) [25, 26]. У лиц с нормально сформированным трехстворчатым АК имеются достаточно четкие соотношения между диаметрами корня аорты на разных уровнях (рис. 1). Ряд исходных планиметрических характеристик корня аорты и их соотношений являются факторами, играющими роли «первого плана» в сохранении оптимальной функции АК в отдаленном периоде после клапаносохраняющей реконструкции и, соответственно, оказывают непосредственное влияние на этап выполнения оперативного приема [27, 28]. В операционной хирург в подавляющем большинстве случаев имеет дело с патологией, характеризующейся неравномерным расширением ФК АК, СВ и зоны СТС, значительным растяжением створок АК и удлинением его комиссур [29]. Важнейшими линейными планиметрическими характеристиками АК и корня аорты являются диаметр ФК АК, высота зоны коаптации створок АК (cH — *coaptation height*), геометрическая (gH — *geometric height*) и эффективная высота (eH — *effective height*) створок АК, а также диаметр аорты в области синусов

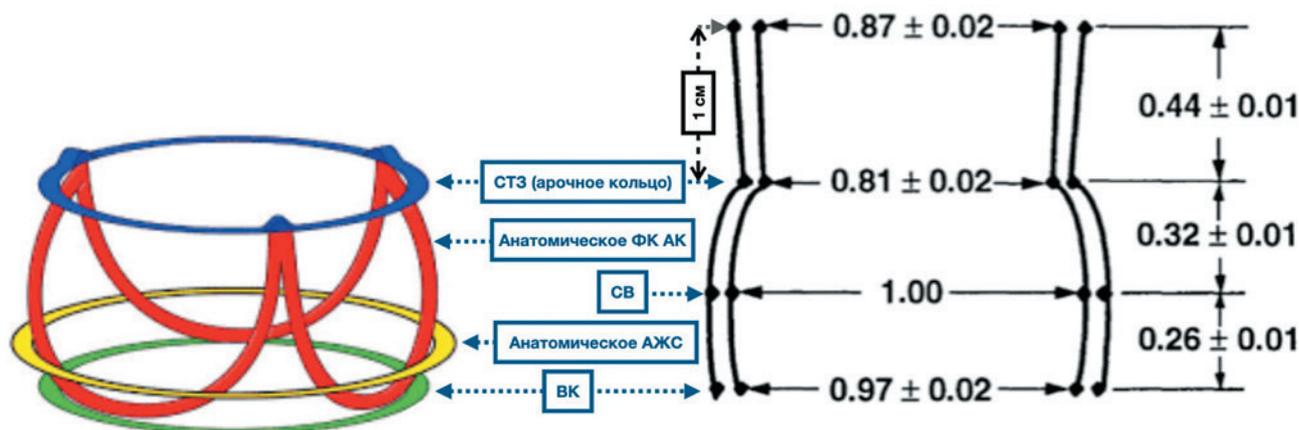


Рис. 1. Жесткие (стержневые) элементы корня аорты и соотношения между его разными отделами (адаптировано из Kunzelman KS, et al. (1994), Anderson RH (2000)) [26, 48].

АЖС — аортожелудочковое соединение, ВК — виртуальное кольцо (уровень нижних краев створок аортального клапана), СВ — синусы Вальсальвы, СТЗ — синотубулярная зона, ФК АК — фиброзное кольцо аортального клапана

Figure 1. Rigid (rod) elements of the aortic root and the relationship between its different sections (adapted from Kunzelman KS, et al. (1994), Anderson RH (2000)) [26, 48]. AVJ — aortoventricular junction, FR AV — fibrous ring of the aortic valve, STZ — sinotubular zone, SV — sinuses of Valsalva, VR — virtual ring (level of the lower edges of the aortic valve cusps)

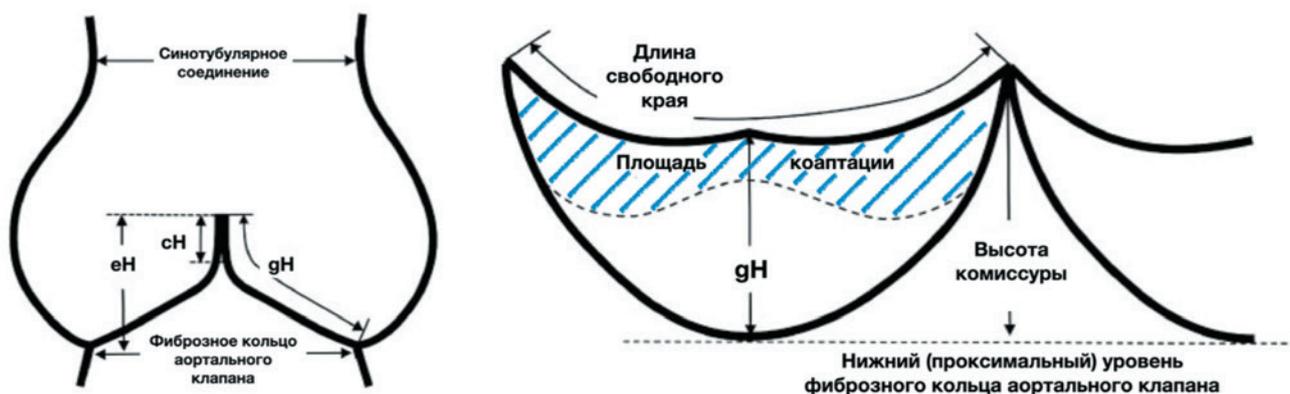


Рис. 2. Планиметрические характеристики аортального клапана (адаптировано из Lansac L, de Kerchove L (2018) [31]). cH — высота коаптации, eH — эффективная высота, gH — геометрическая высота

Figure 2. Planimetric characteristics of the aortic valve (adapted from Lansac L, de Kerchove L (2018) [31]). cH is the coaptation height, eH is the effective height, gH is the geometric height

Вальсальвы и СТС (рис. 2) [30, 31]. Известно, что расширение корня аорты приводит к увеличению диаметра ФК АК, а увеличение размера синотубулярной зоны уменьшает длину и площадь зоны коаптации створок. И то, и другое ведет к смещению створок клапана от центра зоны коаптации в сторону соответствующих синусов и формированию преимущественно центральной регургитации. При этом группа исследователей под руководством Maron G. и соавторов (2013) отметила особую важность соотношения диаметров СТС и СВ. Было доказано, что увеличение этого соотношения приводит к повышению натяжения створок, уменьшению длины и площади их контакта (зоны коаптации) и, как следствие, к формированию АН [32, 33]. Еще одним значимым планиметрическим параметром является геометрическая высота створок АК. Этот термин был введен в клиническую практику в 2006 году коллективом под руководством Schafers H. J. и коллег (2013) [34]. Геометрическая высота представляет собой максимальную длину дуги (контура) створки АК, проведенной перпендикулярно от максимально удаленной точки свободного края створки в центре зоны коаптации до точки прикрепления створки к ФК. Этот параметр позволяет более точно оценить размеры и избыток/недостаток свободной ткани створки, указывая таким образом на риск возникновения рецидива АН за счет пролапса или рестриктивных изменений створок АК. Также авторы предложили оригинальный инструмент для интраоперационного измерения геометрической высоты АК [35].

Материалы и методы

Визуализация и виртуальные реконструкции корня аорты

У подавляющего большинства пациентов с АВА какая-либо специфическая симптоматика отсутствует. Клинические проявления, как правило, обусловлены параллельно существующими или присоединившимися нарушениями функционирования АК (чаще всего АН). Единственным методом лечения является хирургический, а показания к операции определяются на основании степени расширения аорты и ряда дополнительных критериев, приведенных выше. Следовательно, определяющим моментом в диагностике заболевания аорты и выбора метода лечения является визуализация. Как скрининговые исследования аорты и АК, так и высокоточная оценка планиметрии створок АК, параметров ФК, СВ и СТС требует прецизионных методов визуализации и последующих построений виртуальных трехмерных реконструкций (ВТР). Для решения этой задачи возможностей рутинно используемого в клинической практике программного обеспечения, поставляемого вместе с комплексами для выполнения эхокардиографии (ЭхоКГ) и рентгеновской компьютерно-томографической ангиографии (РКТА) аорты, недостаточно. В зарубежных исследованиях последнего десятилетия для интегральной оценки планиметрических изменений АК и корня аорты до и после оперативного лечения используется построение ВТР, создаваемых на основе данных РКТА [36]. Создание высокоточных реконструкций стало возможно благодаря внедрению

нию в клиническую практику специализированных программ — сред автоматизированного проектирования (САПР). Созданные с помощью САПР реконструкции доступны и наглядно демонстрируют трехмерную конфигурацию всех элементов клапанно-аортального комплекса и позволяют с максимальной высокой точностью определять их планиметрические параметры [37, 38].

В настоящее время в клинической медицине применяются различные типы визуализации, так как каждый конкретный вид или комбинация видов является более подходящей для определенного типа ткани, органа или, в некоторых случаях, определенного варианта заболевания. Физические принципы, лежащие в основе визуализации, определяют способы получения изображений. При рентгеновской компьютерной томографии на основании определения степени ослабления рентгеновских лучей в различных направлениях формируются аксиальные (осевые) изображения, или Пироговские срезы, из которых с использованием математических алгоритмов строятся двумерные и трехмерные реконструкции. Более плотные структуры сильнее ослабляют рентгеновские лучи, что делает их более заметными на результирующем изображении, а метод — более подходящим для визуализации твердых, плотных тканей. При магнитно-резонансной томографии измеряется время спиновой релаксации атомов водорода молекулы воды после воздействия радиочастотных импульсов, а сильное магнитное поле более четко «выделяет» мягкие ткани. При ультразвуковом исследовании измеряется время отражения звука (эхо), создаваемого тканями, на которые фокусируется ультразвуковое излучение. Различные типы тканей по-разному отражают звук и, соответственно, формируют разные изображения. Описанные устройства медицинской визуализации хранят полученные изображения в формате DICOM (Digital Imaging and COmmunication in Medicine — цифровая визуализация и связь в медицине) [39]. DICOM — международный стандартный протокол хранения файлов и передачи по сети медицинских изображений. Этот формат обеспечивает совместимость между медицинским оборудованием и инструментами для визуализации от разных производителей. Благодаря своим характеристикам, совместимости и международной стандартизации, DICOM поддерживается основными САПР, используемыми для построения высокоточных реконструкций, в частности, корня аорты и АК.

Для обработки и анализа результатов визуализирующих исследований в настоящее время более или менее широко применяется несколько

программных пакетов. Slicer 3D — программное обеспечение (ПО) с открытым исходным кодом, доступное под лицензией BSD (Berkeley Source Distribution) и имеющее несколько инструментов для анализа и визуализации изображений. Отрицательной стороной данного ПО является сложный графический интерфейс пользователя, в силу чего оно используется преимущественно в академической среде. ПО OsiriX (лицензия GNU GPL-3.0) широко используется рентгенологами и хирургами во всем мире, имеет удобный интерфейс и открытый исходный код, однако имеет версию только для операционной системы OS X, зависит от оборудования Apple Inc. и в бесплатном варианте (для версии для 64-битной архитектуры) обладает весьма урезанными возможностями для обработки изображений. Бесплатным полнофункциональным аналогом OsiriX является ПО Horos (также только для OS X), базирующееся на библиотеках OsiriX и другого ПО с открытым исходным кодом и распространяемое под лицензией GNU LGPL-3.0. ПО FreeSurfer, предназначенное для сегментации и анализа изображений мозга, работает на платформах Linux и OS X и имеет сложный графический интерфейс, требующий для выполнения некоторых задач использования команд Unix. ПО Volview (Kitware Inc.) представляет собой лицензию BSD с открытым исходным кодом, удобным графическим интерфейсом, работающим на платформах Windows, OS X и Linux. Основное его назначение — визуализация DICOM изображений. Широкими возможностями обладают САПР Analyze (клиника Mayo), Amira 3D (FEI), но они имеют сложный графический пользовательский интерфейс. ScanIP (Simpleware) проще в использовании, но содержит меньшее число инструментов. Широко применяемыми профессиональными рентгенологами являются Vitrea (Vital Images) и Vizua, отличающиеся большими возможностями, но и высокой ценой. Удобными пользовательскими интерфейсами и большим количеством инструментов обладают САПР 3D Doctor (Able Software Corp.), Mimics и 3-Matic (Materialise Corp.), а также InVesalius (Centro de Tecnologia da Informação Renato Archer (CTI)), из которых две последние мы и использовали в нашей работе.

Результаты и обсуждение

Клиническое использование высокоточных реконструкций корня аорты

На основании анализа высокоточных реконструкций клапанно-аортального комплекса были высказаны предположения, что ряд исходных параметров могут являться независимыми предик-

торами успеха клапаносохраняющей процедуры, а также способствовать более точному прогнозированию рецидива АН в отдаленном послеоперационном периоде [36–38]. Одними из первых структур корня аорты, планиметрические параметры которых начали изучаться при помощи построения ВТР, стали створки АК и СВ [38]. Выбор объекта исследования не был случаен, так как при

исходном асимметричном расширении корня аорты интраоперационно нередко обнаруживались существенные различия между размерами и формой этих структур, в норме являющихся симметричными. Кроме того, четко оценить конфигурацию и размеры непрерывно движущихся створок АК при рутинной ЭхоКГ либо РКТА невозможно, поэтому компьютерное моделирование открыло новые

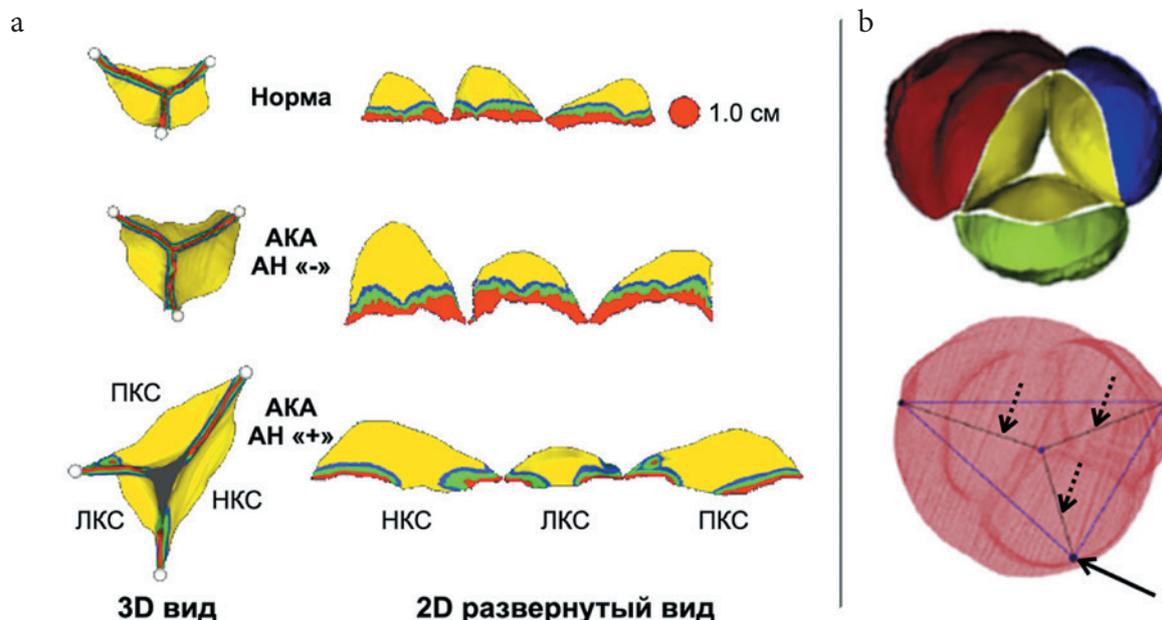


Рис. 3. Конфигурация створок аортального клапана и синусов Вальсальвы в норме и при наличии расширения корня аорты (адаптировано из Kim DH, et al (2014), Yacoub MH, et al (2018) [40, 42]).

а — различия между площадями створок и зонами коаптации створок аортального клапана при отсутствии расширения (Норма) и наличии аневризмы корня аорты (АКА). Растяжение створок характерно для расширения корня аорты и более выражено при наличии аортальной недостаточности (АН), но левая коронарная створка чаще является относительно небольшой. Красный, зеленый, синий и желтый цвета обозначают расстояние от одной до другой прилегающей створки, соответственно, < 1, 2, 3 и > 3 мм (т. е. плотность коаптации от большей к меньшей). ЛКС — левая коронарная створка, НКС — некоронарная створка, ПКС — правая коронарная створка (адаптировано из Kim DH, et al (2014) [40]). б — конфигурация синусов Вальсальвы и створок аортального клапана при асимметричном расширении корня аорты. Сплошной стрелкой обозначено направление максимального расширения, пунктирными стрелками обозначены расстояния от центра зоны коаптации АК до наиболее удаленной от него точки каждого из синусов Вальсальвы (адаптировано из Yacoub MH, et al (2018) [42]).

Figure 3. Aortic valve leaflet and sinus of Valsalva configuration in normal conditions and in the presence of aortic root enlargement (adapted from Kim DH et al (2014), Yacoub MH et al (2018) [40, 42]).

а — differences between the areas of the leaflets and the zones of coaptation of the leaflets of the aortic valve in the absence of expansion (Normal) and the presence of an aortic root aneurysm (ACA). Leaflet distension is characteristic of aortic root dilatation and is more pronounced in the presence of aortic regurgitation (AR), but the left coronary leaflet is often relatively small. Red, green, blue, and yellow indicate the distance from one to the other adjacent leaflet, respectively, < 1, 2, 3, and > 3 mm (i.e., coaptation density from highest to lowest). LCL, left coronary leaflet, LCL, non-coronary leaflet, RCL, right coronary leaflet (adapted from Kim DH, et al (2014) [40]). б — the configuration of the sinuses of Valsalva and the aortic valve leaflets with asymmetric expansion of the aortic root. The solid arrow indicates the direction of maximum expansion, the dotted arrows indicate the distances from the center of the AC coaptation zone to the most distant point of each of the sinuses of Valsalva (adapted from Yacoub MH, et al (2018) [42]).

возможности диагностики аневризм корня аорты. При построении дооперационных ВТР створок АК и измерении длины их коаптации было отмечено, что в некоторых случаях расширение корня аорты сопровождалось резким увеличением площади одной или двух створок клапана вследствие растяжения и повышенных гемодинамических нагрузок. При этом третья створка оказывалась значительно меньше (–40–70 %), чем две соседние. Такое нарушение соотношений площадей створок приводило к значимому уменьшению площади зоны коаптации и, как следствие, к формированию тяжелой АН (рис. 3а) [40]. При изучении планиметрических параметров СВ частой находкой также являлось неравномерное расширение оболочечных элементов корня аорты при формировании аневризмы. Примечательно, что у части пациентов с тяжелой АН не было выявлено значимой асимметрии створок АК, однако площади синусов аорты значительно различались. Метод построения трехмерных реконструкций позволил определить точное расстояние между центром зоны коаптации АК и наиболее удаленной от него точкой каждого из СВ [38, 40, 41]. У пациентов с АН эти параметры также значительно различаются, в отличие от больных с сохранной функцией АК (рис. 3б) [42]. Анализ параметров ФК АК также позволил по-новому взглянуть на его вклад в формирование АН у пациентов с аневризмой корня аорты. Традиционно интерес хирургов был сосредоточен на определении диаметра ФК и высот комиссур АК. При построении объемных реконструкций с использованием САПР было обнаружено, что периметр ФК играет значимую роль в формировании АН. У отдельных пациентов АН была выраженной при отсутствии расширения ФК и значимых изменений СВ и створок АК. Компонентами патогенеза АН в такой ситуации были расширение СТС, уплощение арочных дуг, отдаление вершин комиссур друг от друга и уменьшение эффективной высоты створок АК. С данным типом регургитации прямо коррелировал периметр ФК [43, 44]. До введения в клиническую практику построения ВТР расчет периметра ФК АК практически никогда не выполнялся ввиду его трехмерной конфигурации и технической сложности измерений с помощью стандартного ПО, однако использование ВТР позволило измерять его с высокой точностью во всех необходимых случаях. По мнению большинства исследователей, наиболее значимыми планиметрическими параметрами клапанно-аортального комплекса являются соотношения площадей створок АК, периметр ФК АК, расстояние от наиболее удаленных точек синусов Вальсальвы до центра зоны коаптации ство-

рок АК, объем и площадь синусов аорты, а также межкомиссуральные расстояния [36–38, 40, 41, 43, 44]. Рутинные ЭхоКГ и РКТА аорты не могут предоставить достаточно данных для точной оценки этих параметров и характеризуются меньшей точностью измерений в сравнении с трехмерными моделями, созданными с использованием специализированного ПО. Методики построения трехмерных реконструкций с использованием САПР Mimics и InVesalius подробно описаны в отечественных и зарубежных исследованиях [45–47]. Несмотря на общий прогресс в данном направлении, в связи с технической сложностью получения исходных изображений высокого разрешения и последующего построения ВТР ни один из известных методов ранее не использовался для точного измерения всех структур корня аорты у большой группы пациентов, а приведенные работы выполнены на основании анализа структур корня аорты и АК у 1–5 больных. Нерешенными задачами остаются упрощение и ускорение построения ВТР, а также масштабирование этой методики на группу из более чем 5–10 пациентов.

Алгоритм высокоточной сегментации клапанно-аортального комплекса

Цель нашей работы — разработка алгоритма построения ВТР корня аорты и АК, позволяющего с высокой точностью определять его основные планиметрические параметры: высоты комиссур АК, максимальную длину свободных краев створок АК, максимальную и минимальную площади створок АК, максимальные расстояния от центров дуг каждого из СВ до геометрического центра аорты, а также параметры арочного кольца, анатомического и виртуального ФК АК (максимальный и минимальный диаметры, периметр, площадь поперечного сечения, абсолютная и относительная разница между минимальными и максимальными диаметрами, характеризующая асимметрию). В продольное обзорное исследование было включено 50 пациентов с аневризмой корня аорты и АН 2 и более степени, последовательно оперированных в нашей клинике в период с сентября 2017 года по февраль 2020 года. Исследование было одобрено Локальным этическим комитетом (протокол № 150419 от 08.04.2019 г.). Для создания ВТР использовались результаты РКТА восходящей аорты и АК 50 пациентов с аневризмой корня аорты и АН 2 и более степени, представленные в формате DICOM. Дооперационная РКТА грудной аорты (томограф Somatom Definition AS 128, Siemens) обязательно подразумевала синхронизацию с ЭКГ и по-

лучение первичных аксиальных срезов толщиной $0,82 \pm 0,01$ мм. Размеры полученных первичных срезов составляли 512×512 пикселей при среднем размере пикселя $0,8 \pm 0,01$ мм. В качестве первого этапа построения ВТР использовалось удаление всех визуальных данных, не подлежащих анализу, и первичная сегментация АК. Данные РКТА импортировались в программную среду InVesalius 3.1, где строилась первичная реконструкция ВА с удалением всех прилежащих структур: камер сердца, трахеи, бронхов, пищевода, легких, костей скелета и т. д. Этот эффект достигался подбором соответствующих значений рентгеновской плотности для тканей корня аорты (единицы Хаунсфилда — HU). Рентгеновская плотность тканей аорты и створок АК отличается от плотности окружающих их тканей, и необходимо вручную подобрать диапазон единиц Хаунсфилда, оптимальный для визуализации корня аорты. Контроль подбора рентгеновской плотности осуществляется с помощью цветового заполнения изображений структур корня аорты на плоскостных срезах МСКТ. Как правило, тканям аорты соответствуют показатели рентгеновской плотности -50 — $+150$ HU, створкам АК: $+150$ — $+350$ HU. Необходимо максимально точно подобрать такую плотность, при которой будут одновременно и в полном объеме отображаться и стенки аорты, и створки АК (рис. 4а). После подбора плотности нажатием кнопки «Создать по-

верхность» выполняется автоматическое построение первичного трехмерного изображения корня аорты. На полученной реконструкции должны обязательно отображаться все стенки аорты и створки АК без дефектов. На данном этапе обработки изображения в просвете аорты может наблюдаться значительное количество мелких зернистых артефактов, вероятно, вследствие отражения рентгеновских лучей от контрастного вещества и клеток крови. При неполном отображении структур корня аорты или наличии дефектов визуализации створок необходимо повторно осуществить подбор их рентгеновской плотности до получения изображения соответствующего качества. Далее вручную выполняется удаление с плоскостных срезов РКТА всех структур грудной клетки вокруг корня и восходящего отдела аорты (инструмент «Brush»). Искажения в просвете аорты также, по возможности, подлежат ручному удалению, однако при этом не должны быть удалены структуры корня аорты. При наличии на структурах корня аорты образований, значительно отличающихся по рентгеновской плотности от тканей аорты (кальцинаты, вегетации, полости абсцессов), возможно их отдельное выделение путем подбора соответствующего значения рентгеновской плотности с последующим созданием их реконструкции. Далее работа осуществляется в САПР 3-Matic (Materialise, Leuven, Belgium). В программу 3-Matic v. 13.0 (номер ли-

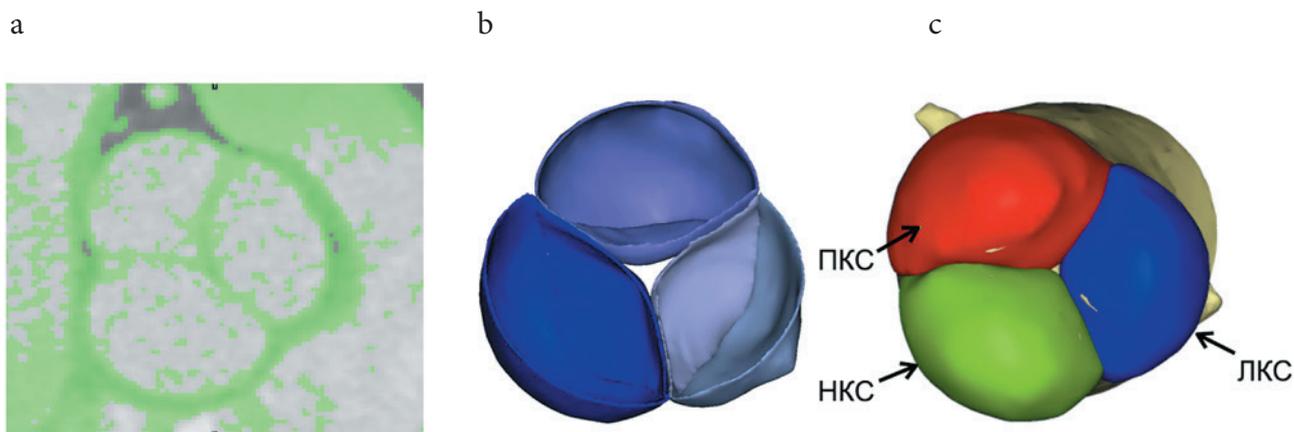


Рис. 4. Этапы построения высокоточной реконструкции корня аорты. Предварительное формирование 3D маски корня аорты в среде автоматизированного проектирования (САПР) InVesalius (а); трехмерная реконструкция корня аорты с аортальной (б) и желудочковой (с) стороны после обработки в САПР 3-Matic

Figure 4. Stages of building a high-precision reconstruction of the aortic root. Preliminary formation of a 3D mask of the aortic root in the computer-aided design (САПР) environment InVesalius (а); three-dimensional reconstruction of the aortic root from the aortic (б) and ventricular (с) sides after processing in САПР 3-Matic

цензии программы: 6D12-F6AA-68A1-BF4D) загружается первичная трехмерная реконструкция корня аорты (файл в формате STL). Далее выполняется удаление всех оставшихся искажений и артефактов в просвете аорты и со стороны желудочковой поверхности створок АК с использованием инструмента «Mark triangle». При наличии искажений на внутренней поверхности стенок аорты и на структурах АК выполняется «сглаживание» их вручную (инструмент «Smooth»). Категорически запрещается обрабатывать таким образом структуры с максимальным размером более 0,3 мм. Далее осуществляется выделение из целостной модели аорты створок АК (инструменты «Mark triangle» и «Paint»). Необходимо помнить, что фиксированный край каждой створки прикрепляется к фиброзному кольцу, а свободный располагается в просвете аорты и коаптит (смыкается) с соседними створками. Общий вид трехмерной реконструкции ВА после обработки в САПР 3-Matic (Materialise) показан на рисунках 4b и 4c. Дальнейшая работа с реконструкцией ВА заключалась в измерениях параметров деликатных структур корня аорты на основании общей модели, для чего использовалось ПО InVesalius v3.1.1. Измерения параметров корня аорты включали определение диаметра виртуального ФК, анатомического ФК (на уровне аорто-желудочкового соединения) и СТС. Диаметр СТС измерялся на уровне высших точек

комиссур (рис. 5a). Выполнялось измерение максимального диаметра СВ в зоне ФК путем расчета диаметра описанной вокруг корня аорты окружности, центром которой являлся центр зоны коаптации (рис. 5b). Диаметр виртуального ФК измерялся на уровне оснований створок АК. Диаметр анатомического ФК измерялся на уровне прикрепления миокарда ВТЛЖ к фиброзным структурам аорты. Также производились измерения периметра ФК АК (рис. 6a), длины свободного края створки (рис. 6b), высоты комиссур и максимального расстояния от геометрического центра аортального клапана до наиболее удаленной точки СВ (рис. 6c).

Основным итогом данной работы стала разработка алгоритма сегментации корня аорты и построения высокоточной трехмерной реконструкции АК, а также практическая реализация алгоритма определения основных его планиметрических параметров с возможностью масштабирования на большую группу пациентов. Описанный метод представляет ценность как для определения тактики и технических особенностей оперативного лечения пациента, так и для изучения влияния анатомии корня аорты на развитие рецидива АН после операции. Метод позволяет построить высокоточную трехмерную реконструкцию внутренних структур корня аорты в течение нескольких часов. При этом трехмерная реконструкция дает возможность детально визуализировать область

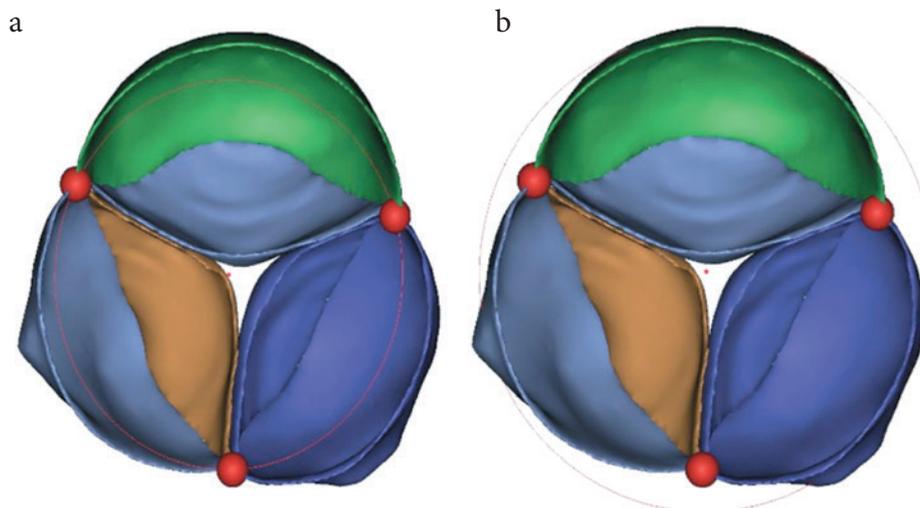


Рис. 5. Измерение параметров высокоточной реконструкции корня аорты. Измерения диаметра фиброзного кольца аортального клапана на уровне синотубулярного соединения (a) и максимального диаметра корня аорты путем построения описанной окружности (b)

Figure 5. Measurement of parameters of high-precision reconstruction of the aortic root. Measurements of the diameter of the aortic valve annulus at the level of the sinotubular junction (a) and the maximum diameter of the aortic root by constructing a circumscribed circle (b)

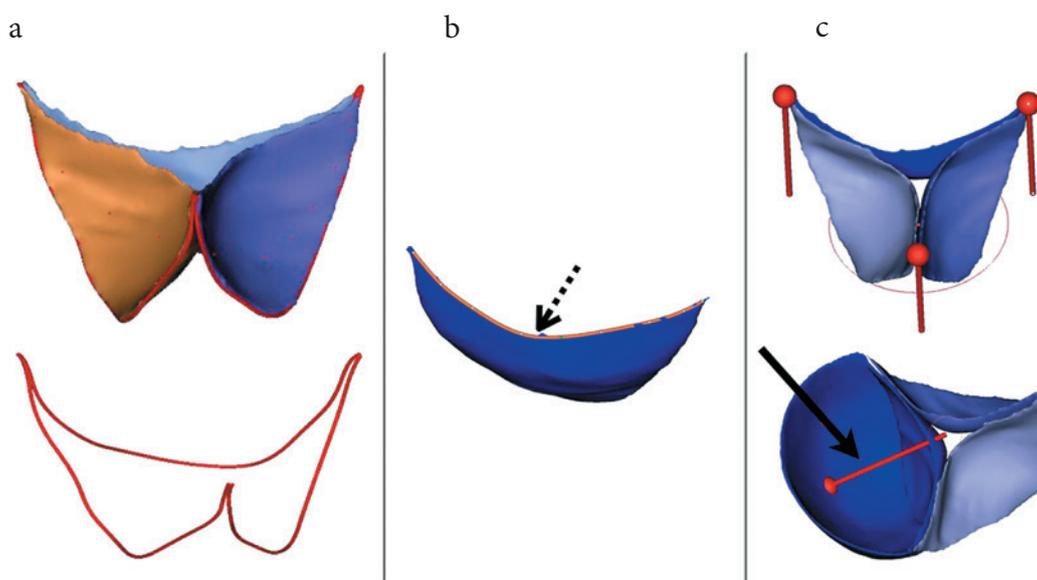


Рис. 6. Измерение параметров высокоточной реконструкции корня аорты. Измерения периметра фиброзного кольца аортального клапана (а), длины свободного края створки (б), высоты комиссур и максимального расстояния от геометрического центра аортального клапана до наиболее удаленной точки синуса Вальсальвы (с)

Figure 6. Measurement of parameters of high-precision reconstruction of the aortic root. Measurements of the perimeter of the fibrous ring of the aortic valve (a), the length of the free edge of the leaflet (b), the height of the commissures and the maximum distance from the geometric center of the aortic valve to the most distant point of the sinus of Valsalva (c)

интереса, что позволяет хирургу получить полную картину состояния корня аорты и АК перед операцией. При исследовании влияния планиметрических параметров АК на развитие патологии в послеоперационном периоде с помощью метода РКТА точность измерений размеров аорты в значительной степени зависит от квалификации специалиста и от правильной ориентации поперечных «срезов» аорты перпендикулярно ее оси. 3D-реконструкция позволяет измерять расстояния между интересующими объектами с точностью до 0,2 мм. При этом используется метод аппаратного построения тангенциальной центральной оси аорты, и измерения размеров сосуда производятся перпендикулярно ей, исключается погрешность, обусловленная ориентацией срезов. Еще одним преимуществом метода над стандартной интерпретацией данных РКТА аорты является возможность измерять такие параметры корня аорты, как площади участков сложной формы (створки АК, синусы аорты), длины объектов сложной формы (периметр ФК АК), минимальные и максимальные расстояния между объектами, что, в свою очередь, служит дополнительным обширным массивом информации и представляет большой интерес для

изучения. Точность измерений достигает 0,2 мм. Нельзя забывать и об ограничениях. Так как описанный метод использует исходные данные РКТА аорты, точность получаемых результатов напрямую зависит от разрешающей способности томографа и от качества выполненного исследования.

Выводы

Наличие высокоточной 3D-реконструкции открывает дополнительные возможности в области оперативного лечения патологии корня аорты и АК: преимущества в выборе индивидуальной пациент-ориентированной тактики оперативного лечения, в выборе параметров имплантируемого операционного материала и/или устройства.

Конфликт интересов / Conflict of interest

Авторы заявили об отсутствии потенциального конфликта интересов. / The authors declare no conflict of interest.

Благодарности / Acknowledgments

Авторы выражают глубокую благодарность заведующему отделением компьютерной томографии детского лечебно-реабилитационного комплекса

ФГБУ «НМИЦ им. В. А. Алмазова» Минздрава России А. Ю. Скрипнику, заведующей отделом лучевой диагностики ФГБУ «НМИЦ им. В. А. Алмазова» Минздрава России к.м.н. И. В. Басек за неоценимую помощь в обследовании пациентов с заболеваниями грудной аорты, а также Г. А. Грубенко за помощь в построении высокоточных компьютерных моделей аортального клапана и корня аорты. / The authors express their deep gratitude to the head of the Computed tomography Department of the Children's medical and rehabilitation complex of the Almazov National Medical Research Centre A. Y. Skripnik, Head of the Department of Radiation Diagnostics of the Almazov National Medical Research Centre, Ph.D. I. V. Basek for invaluable assistance in the examination of patients with diseases of the thoracic aorta, and also G. A. Grubenko for his help in constructing high-precision computer models of the aortic valve and the aortic root.

Список литературы / References

1. Bickerstaff LK, Pairolero PC, Hollier LH, et al. Thoracic aortic aneurysms: a population-based study. *Surgery*. 1982;92(6):1103–8.
2. Clouse WD, Hallett JW Jr, Schaff HV, et al. Acute aortic dissection: population-based incidence compared with degenerative aortic aneurysm rupture. *Mayo Clin Proc*. 2004; 79(2):176–180. DOI: 10.4065/79.2.176.
3. Clift PF, Cervi E. A review of thoracic aortic aneurysm disease. *Echo Res Pract*. 2019; 7(1):R1–R10. DOI: 10.1530/ERP-19-0049.
4. Erbel R, Aboyans V, Boileau C, et al. 2014 ESC Guidelines on the diagnosis and treatment of aortic diseases: Document covering acute and chronic aortic diseases of the thoracic and abdominal aorta of the adult. The Task Force for the Diagnosis and Treatment of Aortic Diseases of the European Society of Cardiology (ESC). *Eur Heart J*. 2014; 35(41):2873–2926. DOI: 10.1093/eurheartj/ehu281.
5. Vahanian A, Beyersdorf F, Praz F, et al. 2021 ESC/EACTS Guidelines for the management of valvular heart disease. *Eur Heart J*. 2022; 43(7):561–632. DOI: 10.1093/eurheartj/ehab395.
6. Joo HC, Chang BC, Youn YN, et al. Clinical experience with the Bentall procedure: 28 years. *Yonsei Med J*. 2012; 53(5):915–923. DOI: 10.3349/ymj.2012.53.5.915.
7. Bentall H, De Bono A. A technique for complete replacement of the ascending aorta. *Thorax*. 1968; 23(4):338–9. DOI: 10.1136/thx.23.4.338.
8. Katselis C, Samanidis G, Papisotiriou A, et al. Long-Term Results after Modified Bentall Operation in 200 Patients. *J Heart Valve Dis*. 2017; 26(6):639–645.
9. Bockeria LA, Malashenkov AI, Fung ZKhSh, et al. Ascending aorta replacement according to classical Bentall de Bono technique with xenopericardial conduit: long-term results. *Annaly khirurgii*. 2012;1:34–41. In Russian [Бокерия Л.А., Малашенков А.И., Фунг З.Х. и др. Протезирование восходящей аорты по классической методике Бенталла-Де Боно ксеноперикардальным кондуитом: отдаленные результаты. *Анналы хирургии*. 2012;1:34–41].
10. Mannacio VA, Mannacio L, Antignano A, et al. Impact of different values of prosthesis-patient mismatch on outcome in male patients with aortic valve replacement. *J Cardiovasc Med (Hagerstown)*. 2017; 18(5):366–373. DOI: 10.2459/JCM.0000000000000508.
11. Bach DS, Kon ND. Long-term clinical outcomes 15 years after aortic valve replacement with the Freestyle stentless aortic bioprosthesis. *Ann Thorac Surg*. 2014; 97(2):544–551. DOI: 10.1016/j.athoracsur.2013.08.047.
12. Bang JH, Im YM, Kim JB, et al. Long term outcomes of aortic root replacement: 18 years' experience. *The Korean journal of thoracic and cardiovascular surgery*. 2013;46(2):104–110. DOI: 10.5090/kjtcs.2013.46.2.104
13. Belov IuV, Komarov RN, Rosseikin EV, et al. Complications of Bentall de Bono operation and ways for improvement of surgical technique. *Kardiologiya i Serdechno-Sosudistaya Khirurgiya*. 2013;6(3):51–54. In Russian [Белов Ю.В., Комаров Р.Н., Россейкин Е.В. и др. Осложнения операции Бенталла-Де Боно и пути совершенствования техники операции. *Кардиология и сердечно-сосудистая хирургия*. 2013;6(3):51–54].
14. Schneider AW, Putter H, Klautz RJM, et al. Long-Term Follow-Up After the Ross Procedure: A Single Center 22-Year Experience. *Ann Thorac Surg*. 2017; 103(6):1976–1983. DOI: 10.1016/j.athoracsur.2016.11.064.
15. Lansac E, Di Cesta I, Raoux F, et al. A lesional classification to standardize surgical management of aortic insufficiency towards valve repair. *Eur J Cardiothorac Surg*. 2008; 33(5):872–878; discussion 878–80. DOI: 10.1016/j.ejcts.2007.12.033.
16. Lancellotti P, Tribouilloy C, Hagendorff A, et al. European Association of Echocardiography recommendations for the assessment of valvular regurgitation. Part 1: aortic and pulmonary regurgitation (native valve disease). *Eur J Echocardiogr*. 2010; 11(3):223–244. DOI: 10.1093/ejehocardiography/jeq030.
17. David TE, Feindel CM. An aortic valve-sparing operation for patients with aortic incompetence and aneurysm of the ascending aorta. *J Thorac Cardiovasc Surg*. 1992; 103(4):617–621; discussion 622.
18. Price J, De Kerchove L, Glineur D, et al. Risk of valve-related events after aortic valve repair. *Ann Thorac Surg*. 2013; 95(2):606–612; discussion 613. DOI: 10.1016/j.athoracsur.2012.07.016.
19. Arabkhani B, Mookhoek A, Di Cesta I, et al. Reported Outcome After Valve-Sparing Aortic Root Replacement for Aortic Root Aneurysm: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Ann Thorac Surg*. 2015; 100(3):1126–1131. DOI: 10.1016/j.athoracsur.2015.05.093.
20. Cherniavskii AM, Al'sov SA, Sirota DA, et al. Remote results of reimplantation of the aortic valve in patients with ascending aortic aneurysm accompanied by aortic insufficiency. *Angiology and Vascular Surgery*. 2015; 21(1):141–147. In Russian [Чернявский А.М., Альсов С.А., Сирота Д.А. и др. Отдаленные результаты операции реимплантации аортального клапана у пациентов с аневризмой восходящего отдела аорты и сопутствующей аортальной недостаточностью. *Ангиология и сосудистая хирургия*. 2015;1:141–147].
21. David TE, Feindel CM, David CM, et al. A quarter of a century of experience with aortic valve-sparing operations. *J Thorac Cardiovasc Surg*. 2014; 148(3):872–879; discussion 879–80. DOI: 10.1016/j.jtcvs.2014.04.048.
22. Gordeev ML, Uspenskiï VE, Ibragimov AN, et al. Surgical treatment of ascending aortic aneurysms. *Kardiologiya i Serdechno-Sosudistaya Khirurgiya*. 2016;

- 9(3):42–50. In Russian [Гордеев М.Л., Успенский В.Е., Ибрагимов А.Н. и др. Хирургическое лечение аневризм восходящего отдела аорты. Кардиология и сердечно-сосудистая хирургия. 2016;9(3):42–50]. DOI: 10.17116/kardio20169342-50
23. Oka T, Okita Y, Matsumori M, et al. Aortic regurgitation after valve-sparing aortic root replacement: modes of failure. *Ann Thorac Surg.* 2011; 92(5):1639–1644. DOI: 10.1016/j.athoracsur.2011.06.080.
24. David TE, David CM, Feindel CM, et al. Reimplantation of the aortic valve at 20 years. *J Thorac Cardiovasc Surg.* 2017; 153(2):232–238. DOI: 10.1016/j.jtcvs.2016.10.081.
25. Dzemeshkevich SL, Stevenson SL, Alexi-Meskishvili VV. Disease aortic valve (function, diagnostics, treatment).: Moscow, GEOTAR-MED, 2004. P. 325. In Russian [Дземешкевич С.Л., Стивенсон Л.У., Алекси-Месхишвили В.В. Болезни аортального клапана (функция, диагностика, лечение). М.: ГЭОТАР-МЕД, 2004. С. 325.]
26. Anderson RH. Clinical anatomy of the aortic root. *Heart.* 2000; 84(6):670–673. DOI: 10.1136/heart.84.6.670.
27. Morganti S, Valentini A, Favalli V, et al. Aortic root 3D parametric morphological model from 2D-echo images. *Comput Biol Med.* 2013; 43(12):2196–2204. DOI: 10.1016/j.combiomed.2013.09.015.
28. Berdajs D, Mosbahi S, Eckstein F, et al. Impact of aortic root annuloplasty on 3D aortic root geometry. *J Surg Res.* 2018; 225:45–53. DOI: 10.1016/j.jss.2017.12.021.
29. Paulsen MJ, Kasinpila P, Imbrie-Moore AM, et al. Modeling conduit choice for valve-sparing aortic root replacement on biomechanics with a 3-dimensional-printed heart simulator. *J Thorac Cardiovasc Surg.* 2019; 158(2):392–403. DOI: 10.1016/j.jtcvs.2018.10.145.
30. Queirós S, Morais P, Fehske W, et al. Assessment of aortic valve tract dynamics using automatic tracking of 3D transesophageal echocardiographic images. *Int J Cardiovasc Imaging.* 2019; 35(5):881–895. DOI: 10.1007/s10554-019-01532-w.
31. Lansac E, de Kerchove L. Aortic valve repair techniques: state of the art. *Eur J Cardiothorac Surg.* 2018; 53(6):1101–1107. DOI: 10.1093/ejcts/ezy176.
32. Marom G, Haj-Ali R, Rosenfeld M, et al. Aortic root numeric model: annulus diameter prediction of effective height and coaptation in post-aortic valve repair. *J Thorac Cardiovasc Surg.* 2013; 145(2):406–411.e1. DOI: 10.1016/j.jtcvs.2012.01.080.
33. Marom G, Einav S. New Insights into Valve Hemodynamics. *Rambam Maimonides Med J.* 2020; 11(2):e0014. DOI: 10.5041/RMMJ.10400.
34. Schäfers HJ, Schmied W, Marom G, et al. Cusp height in aortic valves. *J Thorac Cardiovasc Surg.* 2013; 146(2):269–274. DOI: 10.1016/j.jtcvs.2012.06.053.
35. Schäfers HJ, Bierbach B, Aicher D. A new approach to the assessment of aortic cusp geometry. *J Thorac Cardiovasc Surg.* 2006; 132(2):436–438. DOI: 10.1016/j.jtcvs.2006.04.032.
36. Miyahara S, Omura A, Sakamoto T, et al. Impact of postoperative cusp configuration on midterm durability after aortic root reimplantation. *J Heart Valve Dis.* 2013; 22(4):509–516.
37. Matsushima S, Karliova I, Gauer S, et al. Geometry of cusp and root determines aortic valve function. *Indian J Thorac Cardiovasc Surg.* 2020; 36(Suppl 1):64–70. DOI: 10.1007/s12055-019-00813-2.
38. Kari FA, Siepe M, Rylski B, et al. Aortic valve reimplantation for large root aneurysm and high-grade aortic regurgitation: incidence and implications of additional cusp and commissure repair. *Interact Cardiovasc Thorac Surg.* 2015; 20(5):611–615. DOI: 10.1093/icvts/ivv020.
39. Ismail M, Philbin J. Fast processing of digital imaging and communications in medicine (DICOM) metadata using multiseries DICOM format. *J Med Imaging (Bellingham).* 2015; 2(2):026501. DOI: 10.1117/1.JMI.2.2.026501.
40. Kim DH, Handschumacher MD, Levine RA, et al. Aortic valve adaptation to aortic root dilatation: insights into the mechanism of functional aortic regurgitation from 3-dimensional cardiac computed tomography. *Circ Cardiovasc Imaging.* 2014; 7(5):828–835. DOI: 10.1161/CIRCIMAGING.113.001976.
41. Boodhwani M, de Kerchove L, Watremez C, et al. Assessment and repair of aortic valve cusp prolapse: implications for valve-sparing procedures. *J Thorac Cardiovasc Surg.* 2011; 141(4):917–925. DOI: 10.1016/j.jtcvs.2010.12.006.
42. Yacoub MH, Aguib H, Gamrah MA, et al. Aortic root dynamism, geometry, and function after the remodeling operation: Clinical relevance. *J Thorac Cardiovasc Surg.* 2018; 156(3):951–962.e2. DOI: 10.1016/j.jtcvs.2018.03.157.
43. Ruan Y, Liu X, Meng X, et al. Prognostic factors associated with postoperative adverse outcomes in patients with aortic valve prolapse. *Medicine (Baltimore).* 2020; 99(17):e19827. DOI: 10.1097/MD.00000000000019827.
44. Izzat MB, Hamzeh K, Almohammad F. Precise moulded autologous pericardial configurations for aortic cusp reconstruction. *Interact Cardiovasc Thorac Surg.* 2017; 24(6):819–822. DOI: 10.1093/icvts/ivx023.
45. Bax JJ, Delgado V. Advanced imaging in valvular heart disease. *Nat Rev Cardiol.* 2017; 14(4):209–223. DOI: 10.1038/nrcardio.2017.1.
46. Amorim P, Moraes T, Silva J, et al. Invesalium: an inter-active rendering framework for health care support. In: International symposium on visual computing [Internet]. Springer. https://www.researchgate.net/publication/292154967_InVesalium_An_Interactive_Rendering_Framework_for_Health_Care_Support. (December 2015)
47. Klyshnikov KU, Ovcharenko EA, Ganyukov VI, et al. Algorithm for reconstructing a 3D model of the aortic root using uniform crushing of CT images. *Modern Technologies in Medicine.* 2018;10(4):7–14. DOI:10.17691/STM2018.10.4.01
48. Kunzelman KS, Grande KJ, David TE, et al. Aortic root and valve relationships. Impact on surgical repair. *J Thorac Cardiovasc Surg.* 1994 Jan;107(1):162–70.

Информация об авторах:

Филиппов Алексей Александрович, младший научный сотрудник, врач сердечно-сосудистый хирург ФГБУ «НМИЦ им. В. А. Алмазова» Минздрава России;

Успенский Владимир Евгеньевич, доцент кафедры сердечно-сосудистой хирургии, заведующий НИЛ заболеваний аорты и аортального клапана ФГБУ «НМИЦ им. В. А. Алмазова» Минздрава России;

Карев Егор Андреевич, врач функциональной диагностики, младший научный сотрудник ФГБУ «НМИЦ им. В. А. Алмазова» Минздрава России;

Квиндт Павел Александрович, младший научный сотрудник ФГБУ «НМИЦ им. В. А. Алмазова» Минздрава России;

Пищугин Александр Сергеевич, врач по рентгенэндоваскулярной диагностике и лечению ФГБУ «НМИЦ им. В. А. Алмазова» Минздрава России;

Малашичева Анна Борисовна, д.б.н., старший научный сотрудник ФГБУ «НМИЦ им. В. А. Алмазова» Минздрава России;

Толпыгин Дмитрий Сергеевич, врач сердечно-сосудистый хирург ФГБУ «НМИЦ им. В. А. Алмазова» Минздрава России;

Моисеева Ольга Михайловна, д.м.н., главный научный сотрудник, руководитель НИО некоронарогенных заболеваний сердца ФГБУ «НМИЦ им. В. А. Алмазова» Минздрава России;

Гордеев Михаил Леонидович, д.м.н., профессор, главный научный сотрудник НИО кардиоторакальной хирургии, заведующий кафедрой сердечно-сосудистой хирургии, ФГБУ «НМИЦ им. В. А. Алмазова» Минздрава России.

Author information:

Alexey A. Filippov, junior researcher, adult cardiovascular surgeon, Almazov National Medical Research Centre;

Vladimir E. Uspenskiy, Associate Professor of the Department of Cardiovascular Surgery, Head of the Research Laboratory of Aorta and Aortic Valve Diseases, Almazov National Medical Research Centre;

Egor A. Karev, doctor of functional diagnostics, junior researcher, Almazov National Medical Research Centre;

Pavel A. Kvindt, junior researcher, Almazov National Medical Research Centre;

Alexander S. Pishchugin, doctor for X-ray endovascular diagnosis and treatment, Almazov National Medical Research Centre;

Anna B. Malashicheva, D.Sc., senior researcher, Almazov National Medical Research Centre;

Dmitry S. Tolpygin, adult cardiovascular surgeon, Almazov National Medical Research Centre;

Olga M. Moiseeva, D.Sc., Chief Researcher, Head of the Research Institute of Non-coronary Heart Diseases, Almazov National Medical Research Centre;

Mikhail L. Gordeev, D.Sc., Professor, Chief Researcher of the Research Department of Cardiothoracic Surgery, Head of the Department of Cardiovascular Surgery, Almazov National Medical Research Centre.