

ISSN 2782-3806
ISSN 2782-3814 (Online)
УДК 616.126.52 -089:57.089.67

ОЦЕНКА СТРУКТУРНЫХ И ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ РЕИМПЛАНТИРОВАННОГО АОРТАЛЬНОГО КЛАПАНА ЧЕРЕЗ 18 МЕСЯЦЕВ ПОСЛЕ ОПЕРАЦИИ DAVID I С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДИКИ ВЫСОКОТОЧНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ СТРУКТУР КОРНЯ АОРТЫ

Филиппов А. А.¹, Успенский В. Е.¹, Грубенко Г. А.²,
Толпыгин Д. С.¹, Карев Е. А.¹, Квиндт П. А.¹, Ананьевская П. В.¹,
Колодяжная А. О.¹, Малашичева А. Б.¹, Гордеев М. Л.¹

¹ Федеральное государственное бюджетное учреждение «Национальный медицинский исследовательский центр имени В. А. Алмазова» Министерства здравоохранения Российской Федерации, Научный центр мирового уровня «Центр персонализированной медицины», Санкт-Петербург, Россия

² Компания «ООО Кошелек.ру», Санкт-Петербург, Россия

Контактная информация:

Филиппов Алексей Александрович,
ФГБУ «НМИЦ им. В. А. Алмазова»
Минздрава России,
ул. Аккуратова, д. 2, Санкт-Петербург,
Россия, 197341.
E-mail: aleksei.filippov.chb@gmail.com

Статья поступила в редакцию 05.04.2022
и принята к печати 20.04.2022.

РЕЗЮМЕ

Патологическое расширение корня аорты во многих случаях сопровождается недостаточностью аортального клапана. Наиболее предпочтительным методом хирургического лечения данной патологии является операция David, представляющая собой реимплантацию аортального клапана в протез корня аорты. В настоящее время не имеется исчерпывающих данных о влиянии исходных геометрических параметров структур корня аорты на функционирование реимплантированного аортального клапана после выполнения клапансохраняющего протезирования корня аорты. Нами была создана методика построения и сегментации трехмерной реконструкции аортального клапана и корня аорты, предполагающая последовательное построение реконструкции и сегментацию структур аорты в двух средах автоматизированного проектирования: In Vesalius v 3.1.1 (Centro de Tecnologia da Informação Renato Archer, CTI) и 3-Matic v. 13.0 (Materialise, Leuven, Belgium). Предложенный метод позволяет выполнять точное измерение и оценку планиметрии створок АК, параметров фиброзного кольца, синусов Вальсальвы и синотубулярного соединения. С использованием разработанной методики была выполнена оценка анатомических и функциональных особенностей аортального клапана у пациен-

та в возрасте 68 лет, перенесшего операцию David I. Была произведена сегментация и измерение геометрических параметров корня аорты на дооперационном этапе, а также через 18 месяцев после оперативного лечения. Для оценки функции аортального клапана в непосредственном и отдаленном послеоперационном периодах использовалась детальная эхокардиографическая оценка клапанно-аортального комплекса, включавшая определение объема и площади потока регургитации, ширины vena contracta, фракции регургитации. 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, а также в прогнозировании отдаленных результатов оперативного лечения.

Ключевые слова: аневризма восходящей аорты, аортальный клапан, корень аорты, синусы Вальсальвы, створки аортального клапана.

Для цитирования: Филиппов А.А., Успенский В.Е., Грубенко Г.А., Толпыгин Д.С., Карев Е.А., Квиндт П.А., Ананьевская П.В., Колодяжная А.О., Малашичева А.Б., Гордеев М.Л. Оценка структурных и функциональных особенностей реимплантированного аортального клапана через 18 месяцев после операции David I с использованием методики высокоточного моделирования структур корня аорты. Российский журнал персонализированной медицины. 2022;2(3):78-88. DOI: 10.18705/2782-3806-2022-2-3-78-88

EVALUATION OF STRUCTURAL AND FUNCTIONAL FEATURES OF REIMPLANTED AORTIC VALVE AFTER DAVID I PROCEDURE WITH THE USE OF HIGH-PRECISION 3-DIMENSIONAL SEGMENTATION OF THE AORTIC ROOT

Filippov A. A.¹, Uspenskiy V. E.¹, Grubenko G. A.², Tolpygin D. S.¹, Karev E. A.¹, Kvindt P. A.¹, Ananyevskaya P. V.¹, Kolodiazhnaya A. O.¹, Malashicheva A. B.¹, Gordeev M. L.¹

¹ Almazov National Medical Research Centre, World-Class Research Centre for Personalized Medicine, Saint Petersburg, Russia

² "Koshelek.ru" Company, Saint Petersburg, Russia

Corresponding author:

Filippov Aleksei A.,
Almazov National Medical Research Centre,
Akkuratova str., 2, Saint Petersburg,
Russia, 197341.
E-mail: aleksei.filippov.chb@gmail.com

Received 05 April 2022; accepted 20 April 2022.

ABSTRACT

Aneurysm of the aortic root accompanied by aortic insufficiency is a common cardiovascular pathology. The optimal method of surgical treatment of this pathology is the reimplantation of the aortic valve into the aortic root synthetic prosthesis (David procedure). Currently, there is no comprehensive data on the influence of initial geometric parameters of the aortic root structures on the functioning of the reimplanted aortic valve after valve-preserving aortic root replacement. We have introduced a novel technique for creation and segmentation of a three-dimensional reconstruction of the aortic valve and root, which involves the sequential application of two computer-aided design environments: In Vesalius v 3.1.1 (Centro de Tecnologia da Informação Renato Archer (CTI)) and 3-Matic v. 13.0 (Materialise, Leuven, Belgium). The proposed method allows accurate measurement and evaluation of spatial parameters of the AV leaflets, fibrous ring, sinuses of Valsalva and sinotubular junction. The developed technique was used to evaluate the anatomical and functional features of the aortic valve in a 68-year-old patient who underwent David I procedure. Segmentation and measurement of the geometric parameters of the aortic root were performed before operation, as well as 18 months after surgical treatment. To assess the function of the reimplanted aortic valve during the long-term follow-up, a detailed echocardiographic assessment was used. Echocardiographic assessment included measuring volume and area of the regurgitation flow, the width of vena contracta, and the regurgitation fraction. The application of high-precision 3D reconstruction opens up additional opportunities in the field of surgical treatment of the aortic root and AV pathology: advantages in choosing an individual patient-oriented surgical tactics, parameters of the implanted surgical material and/or device, and in predicting long-term results of surgical treatment.

Key words: aneurysm of the ascending aorta, aortic root, aortic valve, aortic valve leaflets, Valsalva sinuses

For citation: Filippov AA, Uspenskiy VE, Grubenko GA, Tolpygin DS, Karev EA, Kvindt PA, Ananyevskaya PV, Kolodiyhnaya AO, Malashicheva AB, Gordeev ML. Evaluation of structural and functional features of reimplanted aortic valve after David I procedure with the use of high-precision 3-dimensional segmentation of the aortic root. Russian Journal for Personalized Medicine. 2022;2(3):78-88. (In Russ.) DOI: 10.18705/2782-3806-2022-2-3-78-88.

Список сокращений: АВА — аневризма восходящей аорты, АК — аортальный клапан, АН — аортальная недостаточность, ВА — восходящая аорта, ВТЛЖ — выходной тракт левого желудочка, РКТА — рентгеновская компьютерно-томографическая ангиография, САП — среды автоматизированного проектирования, СВ — синусы Вальсальвы, СТС — синотубулярное соединение, ФК — фиброзное кольцо, ЭхоКГ — эхокардиография, ХСН — хроническая сердечная недостаточность.

ВВЕДЕНИЕ

Клапансохраняющая хирургия аневризм корня аорты

Реконструктивная хирургия патологии восходящего отдела аорты, сопровождающейся аортальной недостаточностью, является одной из наиболее сложных проблем современной сердечно-сосудистой хирургии. Сочетание нарушений функционирования аортального клапана с аневризмой восходящей аорты встречается в 5,9 случая на 100 000

населения [1] и ассоциировано с крайне высоким риском развития летальных осложнений.

Единственным эффективным способом лечения данной патологии сегодня является хирургическая коррекция в условиях искусственного кровообращения. Аневризма восходящей аорты без оперативного лечения характеризуется крайне высоким риском острого расслоения, разрыва стенки аневризмы и внезапной смерти [2]. В течение 2 лет после установления данного диагноза около 70 % пациентов имеют высокий риск разрыва аневризмы, и при этом осложнении летальность достигает 95 %. Выживаемость в течение 5–10 лет не превышает 13–19 % [3]. Госпитальная летальность после хирургической реконструкции восходящего отдела аорты и аортального клапана составляет от 3 до 15 % [4]. На сегодня существует 3 основных подхода к хирургическому лечению патологии восходящего отдела аорты: клапансохраняющая операция при отсутствии или слабо выраженных морфологических изменениях аортального клапана, раздельное протезирование восходящей аорты и аортального клапана при невозможности сохранения створок последнего и отсутствии патологии синусов Вальсальвы и полное замещение клапанно-аортального комплекса комбинированным клапаносодержащим протезом (кондуитом) [5].

Наиболее распространенной клапансохраняющей реконструктивной операцией на корне аорты в мире в настоящее время является операция Дэвида (реимплантация аортального клапана в протез) в различных модификациях. В 1992 году Т. David и С. Feindel реализовали революционную идею в хирургии корня аорты, предложив при аневризме восходящей аорты, сопровождающейся аортальной регургитацией, протезировать аорту с сохранением аортального клапана при его удовлетворительном состоянии. При этом иссекались стенки расширенной аорты вместе с синусами Вальсальвы, а створки клапана на комиссурах «подвешивались» (ресуспензировались) внутри протеза; устья коронарных артерий при этом reimплантировались в просвет протеза. Такой метод позволял также дополнительно стабилизировать фиброзное кольцо аортального клапана за счет фиксации протеза к выходному тракту желудочка — зоне аортожелудочкового соединения [6]. Существуют альтернативные методики клапансохраняющих операций, не предусматривающие жесткой фиксации структур аорты к протезу и сохраняющие динамические изменения корня аорты в ходе сердечного цикла, например, операция Yacoub (или ремоделирование корня аорты), предложенная в 1989 году и являющаяся первой выполненной в мире клапансохраняющей операцией.

Общим преимуществом клапансохраняющих операций является: 1) сохранение клапанно-аортального комплекса в физиологичном состоянии; 2) снижение риска кровотечений, связанных с приемом антикоагулянтов; 3) исключение возможности дисфункции протеза клапана сердца вследствие тромбоза, первичной и вторичной дегенерации ксенопротеза [7]. В настоящее время количество выполненных операций в мире неуклонно растет, однако, развитие этих методик ограничивается целым рядом обстоятельств, ведущими из которых являются техническая сложность операции, а также отсутствие объективных критериев интраоперационной визуальной оценки состоятельности reimплантированного аортального клапана.

Важнейшим критерием в оценке отдаленных результатов подобных вмешательств является свобода от аортальной регургитации. По данным исследований, свобода от аортальной недостаточности более 2+ степени при клапансохраняющих операциях в отдаленном (48–56 месяцев) периоде составляет 87,7–88,9 %, вне зависимости от выбора методики операции [8].

Высокоточное моделирование корня аорты

В последние годы был опубликован ряд исследований, детально анализирующих связи геометрических параметров всех компонентов reimплантированного клапанно-аортального комплекса со свободой от аортальной регургитации в отдаленном периоде [9–11]. Так, было показано, что каждая створка аортального клапана имеет сложную трехмерную планиметрию, похожую на «подвесной мост» с зоной прикрепления к аорте, телом и свободным краем створки, коаптирующим с соседними створками. Одним из самых заметных эффектов успешной клапансохраняющей операции стало изменение формы створок от продолговатой, относительно плоской структуры до треугольной чашеобразной конфигурации с удлинением свободного края каждой створки и увеличением периметра зоны коаптации [10]. С другой стороны, длина свободного края каждой створки находится в прямой зависимости от размеров фиброзного кольца аортального клапана и не должна быть избыточной. Фиброзное кольцо АК, в свою очередь, также имеет ряд особенностей. Большое значение придается его форме, которая изменяется в ходе сердечного цикла: от более овальной во время диастолы до круглой во время систолы. Предполагается, что эти динамические изменения снижают сопротивление опорожнению желудочков во время систолы и уменьшают гидродинамическую нагрузку на створках во время диастолы за счет уменьшения площади отверстия

(принимającego более эллипсовидную форму) без изменения периметра последнего [12]. Интересно отметить, что при наиболее распространенной клапансохраняющей операции Дэвида эти динамические изменения минимальны за счет жесткой фиксации кольца аортального клапана протезом. Наконец, сохранение физиологичной конфигурации синусов аорты имеет большое значение для поддержания адекватного коронарного кровотока, а также резервуарной функции аорты [13]. Частично эта проблема была решена использованием при операции Дэвида протезов восходящей аорты с аналогами синусов Вальсальвы.

Для более целостной оценки физиологических изменений аортального клапана и корня аорты до и после оперативного лечения в последних зарубежных исследованиях используется построение графических (трехмерных) реконструкций, создаваемых на основе данных рентгеновской компьютерно-томографической ангиографии (РКТА) [14]. Данные модели доступно и наглядно демонстрируют конфигурацию некоторых элементов клапано-аортального комплекса и корня аорты. На основании анализа таких моделей было высказано предположение, что ряд параметров (например,

длина свободного края и глубина створок, а также соотношение этих величин между соседними створками), форма и объем синусов аорты до операции и их изменение после оперативной коррекции, а также конфигурация фиброзного кольца аортального клапана могут являться независимыми предикторами успеха клапансохраняющей процедуры на дооперационном этапе, а также способствовать формированию более точного прогноза свободы от аортальной недостаточности в отдаленном периоде [15, 16]. Анализ стандартных данных эхокардиографии и РКТА аорты не могут предоставить данных для полноценной оценки этих параметров и обладают меньшей точностью измерений в сравнении с трехмерными моделями, созданными с участием специализированного программного обеспечения. Построение трехмерных реконструкций, как правило, производится в среде автоматизированного проектирования (САП). Данные методики были подробно описаны в исследованиях Вах и соавторов, а также группы Schafers и коллег, однако, ни один из известных методов в настоящее время не способен обеспечить точное измерение всех структур корня аорты [17, 18]. Таким образом, задача создания универсального, высокоточного и легко

Таблица 1. Данные трансторакальной ЭхоКГ и МСКТ перед оперативным вмешательством

Параметр ЭхоКГ и РКТА	Значение
КДО ЛЖ, мл	175
КСО ЛЖ, мл	79
Ударный объем ЛЖ, мл	94
Фракция выброса ЛЖ (Teicholz), %	64
ФК АК, мм	27
Диаметр синусов Вальсальвы (max), мм	57
Диаметр синусов Вальсальвы (min), мм	51
Скорость кровотока на АК, м/с	2,3
Средний градиент на АК, мм рт. ст.	9
Vena contracta, мм	8,5
Rvol AP по PISA, мл	48
Фракция регургитации, %	52

Примечания:

КДО — конечно-диастолический объем, КСО — конечно-систолический объем, ЛЖ — левый желудочек, ФК — фиброзное кольцо, АК — аортальный клапан, Rvol — объем регургитации, AP — аортальная регургитация

Таблица 2. Геометрические параметры корня аорты

Стереометрические параметры корня аорты		Значение
Длины свободных краев створок, мм	правая	29
	левая	31
	некоронарная	32
Площади створок, мм ²	правая	294
	левая	303
	некоронарная	312
Макс. расстояние от центра дуги СВ до центра зоны коаптации, мм	правый	24
	левый	27
	некоронарный	27
Периметр фиброзного кольца АК, мм		177
Диаметр ФК АК на уровне аорто-желудочкового соединения, мм		28,1
Диаметр ФК АК на уровне вершин комиссур, мм		30,2
Эффективная высота, мм		9,0

Примечания: СВ — синусы Вальсальвы, ФК АК — фиброзное кольцо аортального клапана

воспроизводимого способа построения трехмерной реконструкции клапанно-аортального комплекса на сегодняшний день остается нерешенной.

Применение высокоточной 3d-реконструкции клапанно-аортального комплекса в клапансохраняющей хирургии корня аорты

Пациент С., 62 лет, был планово госпитализирован в отделение сердечно-сосудистой хирургии НМИЦ им. В. А. Алмазова с диагнозом «Несиндромная несемейная аневризма корня аорты. Аортальная недостаточность 3 степени». У пациента отсутствовали фенотипические признаки дисплазий соединительной ткани, семейный анамнез также не имел случаев формирования аневризм аорты и других заболеваний соединительной ткани. Наблюдались клинические проявления хронической сердечной недостаточности (ХСН) на уровне 2 функционального класса (NYHA), с значительным прогрессированием одышки и снижением толерантности к физической нагрузке в течение последних 4 месяцев. Значимые сопутствующие заболевания у пациента отсутствовали. По результатам дообследования было принято решение о выполнении одномоментной хирургической коррекции аневризмы корня аорты и тяжелой аортальной недостаточно-

сти в условиях экстракорпорального кровообращения, по методике David I. Данные дооперационной трансторакальной эхокардиографии и РКТА представлены в таблице 1.

Для создания 3D-реконструкции аортального клапана и восходящей аорты использовались данные РКТА в формате DICOM. РКТА грудной аорты с ЭКГ-синхронизацией была выполнена с использованием томографа Somatom Definition (Siemens — 128 slices). Все срезы КТ имели разрешение 512×512 пикселей, и средний размер пикселя составил $0,8 \pm 0,01$ мм. Толщина среза составила $0,82 \pm 0,01$ мм.

Данные РКТА были импортированы в программу InVesalius 3.1. Первым этапом была проведена первичная сегментация аортального клапана. Для этого была сформирована первичная реконструкция аорты и выполнено выделение корня аорты из изображений органокомплекса грудной клетки с удалением всех находящихся в непосредственной близости структур: камеры сердца, трахея, бронхи, пищевод, легкие. На полученной реконструкции обязательно должны отображаться все стенки аорты и створки АК без дефектов, кроме того, наблюдалось значительное число мелких зернистых структур в просвете аорты (вероятно, отражение рентгеновских лучей от контрастного вещества и клеток крови). При неполном отображении структур корня аорты или наличии де-

Таблица 3. Показатели детальной эхокардиографической оценки функции аортального клапана в отдаленном послеоперационном периоде

Показатель	Значение
Vena contracta, мм	1,0
Rvol AP по PISA, мл	3,6;
Rvol AP по уравнению непрерывности потока MV SV-LVOT SV, мл	4,2
EROA AP по PISA, см ²	0,02
Фракция регургитации по УНП, %	4,1
По сумме данных аортальная AP, ст.	0–1

Примечания: Rvol — объем регургитации, AP — аортальная регургитация, EROA — площадь потока регургитации, УНП — уравнение непрерывности потока

фектов створок необходимо повторно осуществить подбор их рентгеновской плотности до получения изображения соответствующего качества. Далее вручную выполнялось удаление всех структур грудной клетки вокруг корня и восходящей 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 осуществлялась в среде автоматизированного проектирования 3-Matic (Materialise, Leuven, Belgium). В программу 3-Matic v. 13.0 загружалась первичная трехмерная реконструкция корня аорты (файл в формате STL), удалялись все оставшиеся искажения и артефакты со стороны аорты и желудочковой поверхности створок аортального клапана. Следует отметить, что категорически запрещается обрабатывать таким образом структуры максимальным размером более 0,3 мм. После этого осуществлялось выделение из целостной модели аорты створок аортального клапана. 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 восходящей аорты после обработки в среде автоматизированного проектирования 3-Matic (Materialise, Leuven, Belgium) показан на рисунке 1.

Результаты измерения параметров клапанно-аортального комплекса

Все измерения выполнялись в среде программы In Vesalius v 3.1.1 (Centro de Tecnologia da Informação

Renato Archer, СТИ). Интересующие нас параметры фиброзного кольца включали в себя измерение диаметра виртуального фиброзного кольца, анатомического фиброзного кольца (на уровне аорто-желудочкового соединения) и синотубулярного соединения. Диаметр виртуального фиброзного кольца измерялся на уровне оснований створок аортального клапана. Диаметр анатомического фиброзного кольца измерялся на уровне прикрепления миокарда выходного отдела левого желудочка к фиброзным структурам аорты. Диаметр синотубулярного соединения измерялся на уровне высших точек комиссур. Также выполнялось измерение максимального диаметра синусов Вальсальвы в зоне фиброзного кольца путем расчета диаметра описанной вокруг корня аорты окружности, центром которой являлся центр зоны коаптации. Периметр фиброзного кольца определялся как сумма длин фиксированных краев полулунных створок. Площади створок аортального клапана определялись программой автоматически, при этом точность определения площади напрямую зависит от точности проведения первичной сегментации створок клапана. Для определения длин свободных краев створок клапана между двумя точками прикрепления створок к стенке аорты строилась кривая линия по верхней границе соответствующей створки при помощи инструмента «Измерить расстояние». Далее ее длина определялась автоматически и принималась за длину свободного края створки. Высоты комиссур АК определялись как наименьшее расстояние от точек прикрепления полулунных створок до плоскости виртуального фиброзного кольца. За максимальное расстояние от геометрического центра аорты до синуса Вальсальвы принимался радиус сферы, описывающей синус в границах синотубулярного

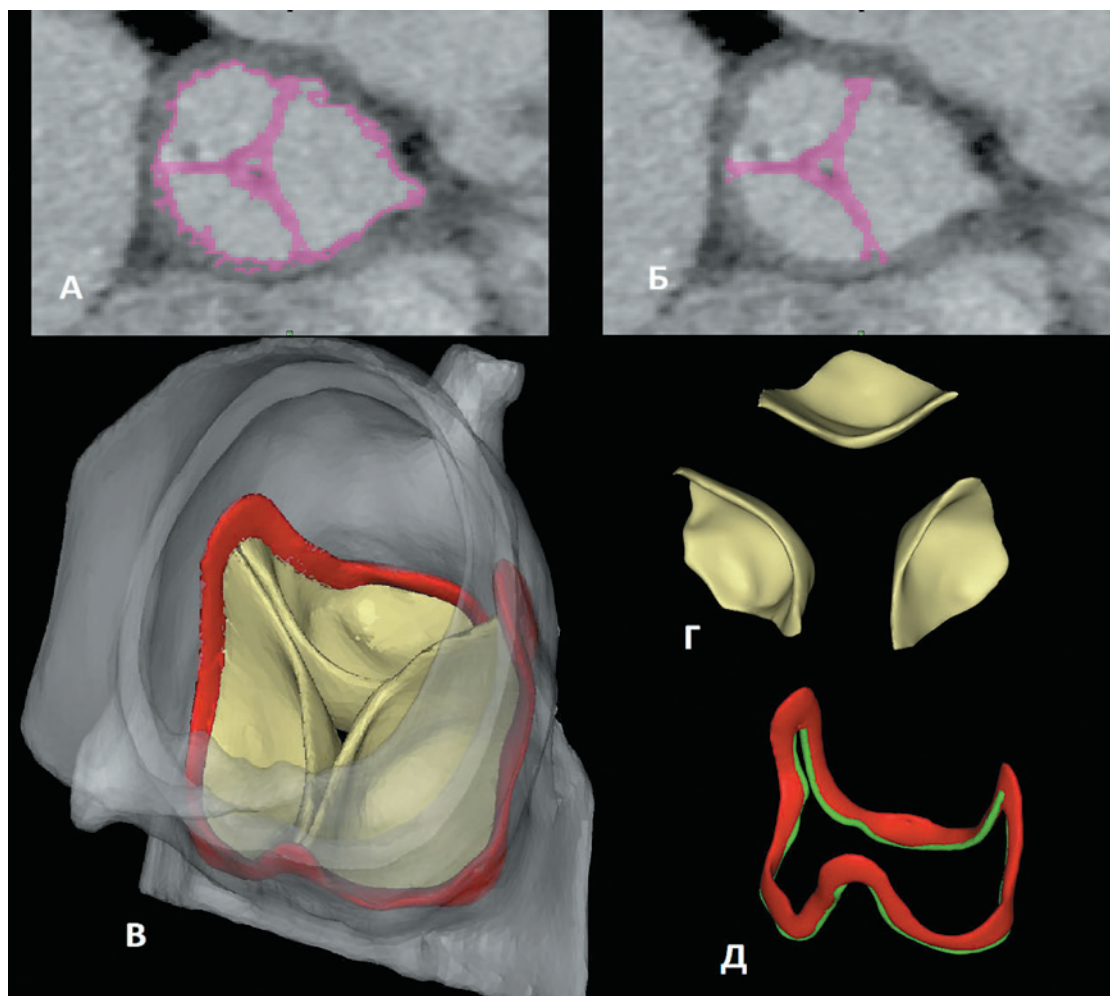


Рис. 1. Этапы построения высокоточной трехмерной реконструкции:

а — создание «3D-маски» аортального клапана, б — выделение зоны коаптации из органокомплекса АК, в — общий вид высокоточной реконструкции корня аорты (обращает на себя внимание нарушение смыкания створок в центре зоны коаптации); г, д — створки и фиброзное кольцо АК после выполнения сегментации структур корня аорты

соединения с центром, совпадающим с геометрическим центром зоны коаптации.

Данные измерений стереометрических параметров корня аорты исследуемого пациента представлены в таблице 2.

Анализ полученных данных показал значительное расширение фиброзного кольца аортального клапана, а также увеличение площадей его створок. Как следствие, отмечалось значительное уменьшение эффективной высоты створок и уменьшение длины зоны коаптации, что, в свою очередь, привело к формированию тяжелой центральной аортальной недостаточности. При этом отмечалось относительно симметричное расширение корня аорты на уровне синусов Вальсальвы, с небольшим преобладанием размеров некоронарной створки и соответствующе-

го синуса аорты. Симметричный характер расширения корня аорты и ретракция створок в сторону соответствующих синусов закономерно обуславливают нарушение смыкания створок в центре зоны коаптации и формирование соответствующего типа АН. Данное наблюдение было подтверждено как данными ЭхоКГ, так и визуализацией АК с помощью трехмерной реконструкции (рис. 1, в).

Симметричный характер расширения корня аорты и отсутствие эксцентричной аортальной регургитации представляют удовлетворительные условия для выполнения клапансохраняющего протезирования корня аорты. Оперативное лечение аневризмы корня аорты было выполнено по методике David I в условиях экстракорпорального кровообращения и изотермической кровяной кардиopleгии. Пери-



Рис. 2. Общий вид реконструкции аортального клапана, реимплантированного в протез корня аорты (18 месяцев после операции David I).

Розовым цветом отмечено устье левой коронарной артерии, реимплантированное на «площадке» по Kouchoukos

операционный период протекал без особенностей, пациент был переведен из отделения интенсивной терапии в общую палату на 1-е сутки после операции и выписан из стационара на 16-е сутки после операции. Интраоперационно и при выписке по данным ЭхоКГ отмечалась приклапанная АН.

Оценка реимплантированного аортального клапана в отдаленном послеоперационном периоде

Контрольное обследование пациента с целью оценки функционирования реимплантированного аортального клапана было выполнено через 18 месяцев после оперативного вмешательства. Клинически отмечалась полная регрессия явлений застойной ХСН, значимое повышение толерантности к физической нагрузке. Инструментальный этап обследования включал выполнение контрольной ЭхоКГ и РКТА с повторным построением высокоточной 3D-реконструкции реимплантированного АК и оценкой его структурных и функциональных особенностей. Данные ЭхоКГ в отдаленном периоде представлены в таблице 3.

По данным ЭхоКГ, прогрессирования АН в отдаленном периоде не отмечалось. Аортальная регургитация по сумме данных не превышала приклапанную (0–1 ст.). Полученные данные коррелировали с клинической картиной регрессировавшей ХСН, а также послеоперационными данными высокоточ-

ной реконструкции, показавшей восстановление коаптации створок, а также отсутствие их пролапса или рестрикции (рис. 2).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основным результатом данного исследования была разработка алгоритма сегментации корня аорты и построения высокоточной трехмерной реконструкции АК, а также разработка алгоритма определения основных его геометрических параметров. 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 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. 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.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Цукерман Г.И., Малашенков А.И., Хассан А., Русанов Н.И., Мовсесян Р.А. Хирургия аневризм восходящей аорты: ретроспективная оценка. Грудная и сердечно-сосудистая хирургия. 1996; 3: 68–72.
2. Разумова Е.Т., Люсова В.А., Кокорин В.А. Расслоение аорты. Российский кардиологический журнал. 2001; 5: 88–94.
3. Русанов Н.И., Дорофеев А.В., Мовсесян Р.А., Малашенков А.И., Кондратьев В.Г., Паджев М.А., Быкова В.А., Шаноян С.А., Занкина О.И., Яковлев С.Е. Неотложные операции при остром расслоении аневризмы аорты типа А. Грудная и сердечно-сосудистая хирургия. 2003; 4: 35.
4. David TE, Maganti M, Armstrong S. Aortic root aneurysm: principles of repair and long-term follow-up. J Thorac Cardiovasc Surg. Dec 2010; 140, 6 Suppl: 14–19.
5. Kallenbach K, Pethig K, Schwarz M, Milz A, Haverich A, Harringer W. Valve sparing aortic root reconstruction versus composite replacement — perioperative course and early complications. Eur J Cardiothorac Surg. July 2001; 20 (1): 77–81.
6. David TE, Feindel CM. An aortic valve-sparing operation for patients with aortic incompetence and aneurysm of the ascending aorta. J Thorac Cardiovasc Surg. Apr 1992; 103 (4): 617–621.
7. David TE, Feindel CM, Webb GD, Colman JM, Armstrong S, Maganti M. Long-term results of aortic valve-sparing operations for aortic root aneurysm. J Thorac Cardiovasc Surg. Aug 2006; 132 (2): 347–354.
8. Чернявский А.М., Столяров М.С., Ломиворотов В.В., Кливер Е.Н., Попов И.Л., Ковляков В.А., Зайцев Г.С. Хирургическое лечение аневризмы восходящего отдела аорты и аортальной недостаточности путем выполнения реимплантации аортального клапана в синтетический протез (операция David I). Патология кровообращения и кардиохирургия. 2004; 4: 69–71.
9. Berdajs D, Mosbahi S, Forro Z, Gerber C, Ferrari E. Numerical analysis of the 3-dimensional aortic root morphology during the cardiac cycle. Eur J Cardiothorac Surg. 2016; 49: 1213–21.
10. Bierbach BO, Aicher D, Issa OA, Bomberg H, Graber S, Glombitza P. Aortic root and cusp configuration determine aortic valve function. Eur J Cardiothorac Surg. 2010; 38: 400–6.
11. Kuniyara T, Aicher D, Rodionychewa S, Groesdonk HV, Langer F, Sata F, et al. Preoperative aortic root geometry and postoperative cusp configuration primarily determine long-term outcome after valve-preserving aortic root repair. J Thorac Cardiovasc Surg. 2012; 143: 1389–95.
12. Marom G, Haj-Ali R, Rosenfeld M, Schafers HJ, Raanani E. Aortic root numeric model: annulus diameter prediction of effective height and coaptation in post-aortic valve repair. J Thorac Cardiovasc Surg. 2013; 145: 9–11.
13. Hamdan A, Guetta V, Konen E, Goitein O, Segev A, Raanani E, et al. Deformation dynamics and mechanical properties of the aortic annulus by 4-dimensional computed tomography. J Am Coll Cardiol. 2012; 59: 119–27.
14. Dagum P, Green GR, Nistal FJ, Daughters GT, Timek TA, Foppiano LE, et al. Deformational dynamics of the aortic root: modes and physiologic determinants. Circulation. 1999; 100.
15. Kim DH, Handschumacher MD, Levine RA, Joo Sun B, Jang JY, Yang DH, 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: 828–35.
16. Lansac E, Lim H-S, Shomura Y, Hiang Lim K, Rice NT, Goetz WA, et al. Aortic root dynamics are asymmetric. J Heart Valve Dis. 2005; 14: 400–7.

17. Bax JJ, Delgado V. Advanced imaging in valvular heart disease. *Nat Rev Cardiol.* 2017; 14:209–23],

18. Schafers H-J, Bierbach B, Aicher D. A new approach to the assessment of aortic cusp geometry. *J Thorac Cardiovasc Surg.* 2006; 132:436–8.

Информация об авторах:

Филиппов Алексей Александрович, младший научный сотрудник НИЛ заболеваний с избыточной кальцификацией НЦМУ «Центр персонализированной медицины», младший научный сотрудник НИЛ заболеваний аорты и аортального клапана ФГБУ «НМИЦ им. В. А. Алмазова» Минздрава России;

Успенский Владимир Евгеньевич, д.м.н., заведующий НИЛ заболеваний аорты и аортального клапана ФГБУ «НМИЦ им. В. А. Алмазова» Минздрава России;

Грубенко Григорий Александрович, специалист по тестированию программ для ЭВМ, Компания «ООО Кошелек.ру»;

Толпыгин Дмитрий Сергеевич, к.м.н., врач сердечно-сосудистый хирург отделения сердечно-сосудистой хирургии № 3 ФГБУ «НМИЦ им. В. А. Алмазова» Минздрава России;

Карев Егор Андреевич, младший научный сотрудник НИЛ заболеваний аорты и аортального клапана ФГБУ «НМИЦ им. В. А. Алмазова» Минздрава России;

Квиндт Павел Александрович, младший научный сотрудник НИЛ заболеваний с избыточной кальцификацией НЦМУ «Центр персонализированной медицины», ФГБУ «НМИЦ им. В. А. Алмазова» Минздрава России;

Ананьевская Полина Валерьевна, старший научный сотрудник НИЛ биостатистики ФГБУ «НМИЦ им. В. А. Алмазова» Минздрава России;

Колодяжная Алина Олеговна, клинический ординатор кафедры акушерства и гинекологии ФГБУ «НМИЦ им. В. А. Алмазова» Минздрава России;

Малашичева Анна Борисовна, д.б.н., старший научный сотрудник НИЛ заболеваний с избыточной кальцификацией НЦМУ «Центр персонализированной медицины», ФГБУ «НМИЦ им. В. А. Алмазова» Минздрава России;

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

Author information:

Filippov Aleksei A., Researcher of the Research Laboratory of diseases with excessive calcification of the World-Class Research Centre for Personalized Medicine;

Uspenskiy Vladimir E., MD, PhD, Head of the Research Laboratory of the aorta and aortic valve diseases of the Almazov National Medical Research Centre;

Grubenko Grigorii A., Specialist for digital software testing, “Koshelek.ru” Company;

Tolpygin Dmitry S., PhD, Cardiothoracic surgeon of the Department of cardio-thoracic surgery of the Almazov National Medical Research Centre;

Karev Egor A., Researcher of the Research Laboratory of the aorta and aortic valve diseases of the Almazov National Medical Research Centre;

Kvindt Pavel A., Researcher of the Research Laboratory of diseases with excessive calcification of the World-Class Research Centre for Personalized Medicine;

Ananyevskaya Polina V., Senior researcher at Biostatistics laboratory of the Almazov National Medical Research Centre;

Kolodyazhnaya Alina O., Clinical Resident of the Department of Obstetrics and Gynecology of the Almazov National Research Medical Centre;

Malashicheva Anna B., PhD, Senior Researcher of the Research Laboratory of diseases with excessive calcification of the World-Class Research Centre for Personalized Medicine;

Gordeev Mikhail L., Head of the Research Unit of Cardiothoracic Surgerz of the Almazov National Medical Research Centre.