

КОМПЬЮТЕРНАЯ ТОМОГРАФИЯ В ОЦЕНКЕ СОСТОЯНИЯ КОРНЯ АОРТЫ У ПАЦИЕНТОВ С КРИТИЧЕСКИМ АОРТАЛЬНЫМ СТЕНОЗОМ

Гафси Б.Э.¹, Веселова Т.Н.², Терновой С.К.^{1,2}, Ширкин А.В.²

1 – ФГАОУ ВО Первый МГМУ им. И.М. Сеченова МЗ РФ (Сеченовский университет). г. Москва, Россия.

2 – ФГБУ НМИЦ кардиологии им. академика Е.И. Чазова МЗ РФ. г. Москва, Россия.

В статье представлены обзор литературы и собственные данные, посвященные роли компьютерной томографии (КТ) при обследовании пациентов с критическим аортальным стенозом перед транскатетерной имплантацией аортального клапана (ТИАК). Приведены данные о стандартных протоколах КТ для оценки анатомии аортально-клапанного комплекса, представлены работы, посвященные сравнительному анализу методов мануальной и полуавтоматической обработки изображений, выбору оптимальной фазы сердечного цикла для проведения КТ перед ТИАК, сопоставлению данных КТ и эхокардиографии для измерения площади отверстия аортального клапана, оценке выраженности кальциноза аортального клапана и перспективным направлениям КТ в обследовании больных перед ТИАК.

Ключевые слова: аортальный стеноз, компьютерная томография, транскатетерная имплантация аортального клапана, кальциноз.

Контактный автор: Гафси Б.Э., e-mail: gafsibehaeddine@gmail.com

Для цитирования: Гафси Б.Э., Веселова Т.Н., Терновой С.К., Ширкин А.В. Компьютерная томография в оценке состояния корня аорты у пациентов с критическим аортальным стенозом. REJR 2023; 13(4):101-109. DOI: 10.21569/2222-7415-2023-13-4-101-109.

Статья получена: 11.08.23

Статья принята: 30.10.23

COMPUTED TOMOGRAPHY IN THE EVALUATION OF THE AORTIC ROOT IN PATIENTS WITH CRITICAL AORTIC STENOSIS

Gafsi B.E.¹, Veselova T.N.², Ternovoy S.K.^{1,2}, Shirkin A.V.²

1 – Sechenov University.

2 – E.I. Chazov National Medical Research Centre of Cardiology. Moscow, Russia.

This article presents a literature review and our own data on the role of computed tomography (CT) in the evaluation of patients with critical aortic stenosis before transcatheter aortic valve implantation (TAVI). The review includes data on standard CT protocols for the evaluation of aortic valve complex anatomy, the works devoted to the comparative analysis of manual and semi-automatic image processing methods, selection of the optimal phase of the cardiac cycle for CT before TAVI, comparison of CT and echocardiography data for measuring the aortic valve orifice area, evaluation of aortic valve calcinosis severity, and promising directions of CT in the examination of patients before TAVI.

Keywords: aortic stenosis, computed tomography, transcatheter aortic valve implantation, calcification.

Corresponding author: Gafsi B.E., e-mail: gafsibehaeddine@gmail.com

For citation: Gafsi B.E., Veselova T.N., Ternovoy S.K., Shirkin A.V. Computed tomography in the evaluation of the aortic root in patients with critical aortic stenosis. REJR 2023; 13(4):101-109. DOI: 10.21569/2222-7415-2023-13-4-101-109.

Received: 11.08.23

Accepted: 30.10.23

Компьютерная томография (КТ) является обязательным методом визуализации при предоперационном планировании транскатетерной имплантации аортального клапана (ТИАК). ТИАК – это минимально инвазивная процедура, которая заменяет аортальный клапан без необходимости проведения операции на открытом сердце. Успех процедуры зависит от точного предоперационного планирования, которое включает оценку анатомии аортального клапана, размера и формы аортального кольца, расположения и степени его кальцификации, а также места доступа к клапану [1, 2].

КТ предоставляет подробную информацию об анатомии аортального клапана и окружающих его структур, что делает ее идеальным методом визуализации для выбора правильного размера протеза, чтобы свести к минимуму риск парапротезной регургитации, частота которой, по данным разных авторов, составляет от 1% до 39% [3]. КТ позволяет выявить другие анатомические особенности, которые могут повлиять на успех процедуры ТИАК, например, наличие двустворчатого аортального клапана, обызвествления створок и подклапанного кальциноза [4, 5].

У пациентов с аортальным стенозом и выраженным нарушением функции почек предпочтительнее выполнять МРТ в качестве альтернативного метода оценки анатомии корня аорты [6]. МРТ позволяет проводить все необходимые для ТИАК измерения, однако в рутинной практике применение данного метода ограничено из-за более длительного времени обследования, отсутствия стандартизованного протокола и невозможности количественной оценки кальциноза аортального клапана. Важными преимуществами КТ являются быстрота и точность диагностики, стандартизованный протокол исследования и постобработки изображений.

Протокол КТ должен включать большой анатомический диапазон от подключичных до бедренных артерий, с выполнением ЭКГ-синхронизации на уровне сердца. Существуют общие рекомендации для оптимизации протокола проведения КТ перед ТИАК [7], однако они не дают указаний по поводу

технических характеристик компьютерного томографа. По опыту ряда авторов [6 – 8], томографы с 64 и более рядами детекторов являются наиболее предпочтительными, так как обладают оптимальной диагностической точностью для выявления обструктивного поражения коронарных артерий, которое может потребовать проведения реваскуляризации миокарда перед процедурой ТИАК.

При планировании ТИАК важно точно оценить максимальные размеры корня аорты и фиброзного кольца для выбора оптимального размера протеза. Учитывая, что во время систолы происходит растяжение фиброзного кольца, приводящее к некоторому увеличению его площади и периметра по сравнению с диастолическими размерами, консенсус специалистов КТ рекомендует измерять наибольший размер фиброзного кольца в фазу максимальной систолы [9]. Данные одноцентрового ретроспективного исследования Steffen J. и соавт. показали, что выбор размера протеза на основании измерений, выполненных во время систолы по сравнению с диастолой, не оказал существенного влияния на 30-дневные клинические исходы, но коррелировал с более низким уровнем смертности от всех причин в отдаленном периоде [10].

Для оценки анатомии корня аорты производят мануальные или полуавтоматические измерения, выполненные в строго определенных плоскостях. Стандартные ортогональные плоскости изображения такие, как аксиальная плоскость, не подходят для правильной визуализации корня аорты и содержащихся в нем структур. Для получения точных размеров необходимо, чтобы реконструкции изображений были выполнены по короткой оси на уровнях фиброзного кольца АК, выходного тракта ЛЖ, синусов Вальсальвы и синотубулярного соединения (рис. 1).

Полуавтоматическая обработка изображений позволяет избежать погрешностей при построении поперечного сечения структур корня аорты, автоматически определить три базальные точки прикрепления створок АК на уровне фиброзного кольца, вручную выбрать остальные уровни корня аорты, при этом расчеты диаметров, площадей и периметров полностью автоматизированы (рис.

	Сагиттальная плоскость	Фронтальная плоскость	Реконструкции по короткой оси
Фиброзное кольцо			
Выходной тракт левого желудочка			
Синусы Вальсальвы			
Синотубулярное соединение			

Рис. 1 (Fig. 1)

Рис. 1. Серия увеличенных КТ изображений, полученных в артериальную фазу, реконструированных в разных плоскостях для точного измерения размеров корня аорты.

Розовая линия – длинная ось аорты во фронтальной плоскости, голубая линия – длинная ось аорты в сагиттальной плоскости, желтая линия – поперечная ось, перпендикулярная к длинной оси аорты. Измерения размеров фиброзного кольца, выходного тракта ЛЖ, синуса Вальсальвы и синотубулярного соединения проводятся на реконструкциях изображений по короткой оси (на изображениях указаны измерения в сантиметрах).

Fig. 1. Series of enlarged CT images acquired during the arterial phase, oriented in different planes, to accurately measure the size of the aortic root.

The pink line is the aortic long axis in the frontal plane, the blue line is the aortic long axis in the sagittal plane and the yellow line is the transverse axis perpendicular to the aortic long axis. Measurements of the dimensions of the aortic annulus, LV outflow tract, sinus of Valsalva and sino-tubular junction are performed on short-axis image reconstructions (images show measurements in centimeters).

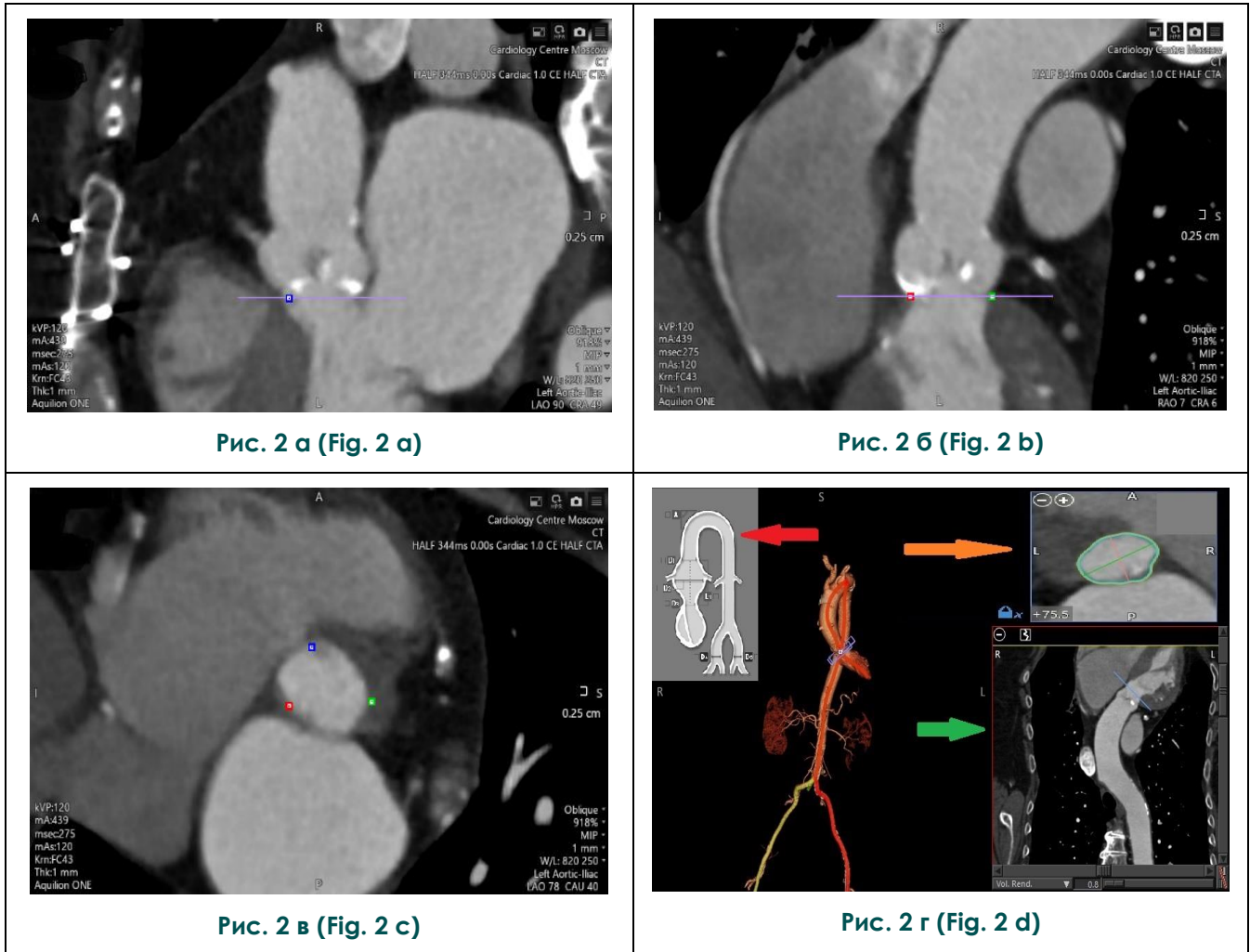


Рис. 2 а (Fig. 2 а)

Рис. 2 б (Fig. 2 б)

Рис. 2 в (Fig. 2 с)

Рис. 2 г (Fig. 2 д)

Рис. 2. Полуавтоматическая обработка КТ изображений корня аорты с использованием программного обеспечения Vitrea.

А – выбор области измерения во фронтальной проекции. Б – выбор области измерения в проекции выходного тракта ЛЖ. В – автоматическое построение изображения поперечного сечения фиброзного кольца. Синяя, красная и зеленая точки обозначают верхушки каждого из трёх синусов Вальсальвы. Фиолетовая линия – поперечная ось на уровне фиброзного кольца. Г – рабочее пространство программного обеспечения: в центре – трехмерная реконструкция аорты, красная стрелка указывает на схему аорты с обозначением зон интереса, оранжевая стрелка – на поперечное сечение фиброзного кольца с автоматическим измерением минимального и максимального размеров, зеленая стрелка – на криволинейную реконструкцию с возможностью быстрого выбора зоны интереса аорты с помощью планки.

Fig. 2. Semi-automated processing of CT images of the aortic root using Vitrea software.

A – selection of the measurement area in the frontal projection. B – selection of the measurement area in the projection of the LV outlet tract. C – automatic construction of the cross-sectional image of the aortic annulus. Blue, red and green points indicate the apexes of each of the three sinuses of Valsalva. The purple line is the transverse axis at the level of the aortic annulus. D – software workspace: in the center – three-dimensional reconstruction of the aorta, the red arrow points to the aortic scheme with the designation of zones of interest, the orange arrow – to the cross section of the aortic annulus with automatic measurement of the minimum and maximum dimensions, the green arrow – to the curvilinear reconstruction with the possibility of quick selection of the aortic zone of interest using the bar.

2).

В сравнительных исследованиях изучалась точность и воспроизводимость мануального и полуавтоматического способов измерений размеров аорты и аортального клапана на основе КТ. Horehledova В. и соавт. [11] оценили использование полуавтоматического способа измерений у 121 пациента перед процедурой ТИАК. Полуавтоматический способ, использованный в исследовании, включал компьютерный анализ КТ корня аорты, который сравнивался с данными мануальных измерений, выполненными двумя независимыми исследователями. Исследование показало высокую сопоставимость данных, полученных полуавтоматическим и мануальными способами, при этом длительность обработки сократилась в два раза. Таким образом, полуавтоматический способ является надежной, быстрой и эффективной альтернативой мануальному способу измерений размеров корня аорты. Согласованность полуавтоматических измерений между разными исследователями позволяет максимально стандартизировать процесс постобработки изображений с высоким уровнем достоверности результатов измерений независимо от опыта исследователя.

Особый интерес представляют данные, представленные Astudillo Р. и соавт. [12]. В этой работе предложен новый автоматический метод анализа топографии и размеров корня аорты по данным КТ-изображений с использованием метода машинного обучения. Предлагаемый метод продемонстрировал высокую точность, быстроту и воспроизводимость результатов. Время анализа изображения одного пациента составляло менее одной секунды. Одним из ограничений данной работы является относительно небольшой размер выборки, использованной в исследовании. Данная модель машинного обучения была разработана и протестирована с использованием набора данных, включающего всего 344 пациента, перенесших процедуру ТИАК, что, возможно, не является репрезентативным для более широкой популяции пациентов и требует дальнейшей валидации метода.

Теоретически считается, что площадь отверстия аортального клапана (ПОАК) лучше всего отражает тяжесть аортального стеноза, поскольку на нее меньше влияют гемодинамические параметры. Известно, что эллиптическая форма выходного тракта левого желудочка вызывает недооценку ПОАК, рассчитанного из уравнения непрерывности и, таким образом, переоценку аортального стеноза. В исследовании Mittal Т.К. и соавт. бы-

ло продемонстрировано, что почти у четверти пациентов с тяжелым аортальным стенозом по данным стандартного доплеровского исследования ПОАК, измеренная с помощью КТ, оказалась более 1 см² [13]. Авторы сделали вывод, что данное несоответствие может быть связано с высокоскоростным потоком крови через выходной тракт ЛЖ, что приводит к искажению расчетных параметров доплер-ЭхоКГ.

Для оценки ПОАК необходимо выбрать серию КТ-изображений, полученных в систолическую фазу сердечного цикла с максимальным открытием аортального клапана. На реконструкциях изображений сердца во фронтальной и сагиттальной плоскостях выставляют взаимно перпендикулярные оси: одна ось проходит вдоль аорты, вторая – между свободными краями некоронарной и левой коронарной створок. На полученном изображении аортального клапана по короткой оси проводят измерение ПОАК (рис. 3).

Choe J. и соавторы [14] определили разность результатов при измерении ПОАК, полученных с помощью ЭхоКГ и КТ у пациентов с тяжелым аортальным стенозом, а также обнаружили факторы, оказывающие влияние на вероятную погрешность полученных результатов. В итоге проведенной работы была выявлена высокая корреляция между ПОАК, измеренной с помощью КТ и ЭхоКГ, однако результаты КТ имели более точный характер. Исследование показало, что повышенная масса тела пациента, особенности расположения аортального клапана (обуславливающие сложность его визуализации, связанной с установкой УЗ-датчика), морфологические особенности клапанов аорты и размеры фиброзного кольца играют существенную роль в получении менее точных результатов при ЭхоКГ. В таких случаях совместное использование КТ и ЭхоКГ для оценки тяжести аортального стеноза может значительно улучшить достоверность полученных результатов (рис. 4).

Количественная оценка кальциноза аорты и аортально-клапанного комплекса методом КТ имеет важное значение при обследовании пациентов с аортальным стенозом. В многоцентровом исследовании Т. Pawade и соавт. [15] было показано, что пороговые значения кальциноза аортального клапана (>1300 ед. для женщин и >2000 ед. для мужчин) являются надежным маркером тяжелого аортального стеноза. Более того, было продемонстрировано, что пороговое значение кальциевого индекса является независимым предиктором неблагоприятных клинических событий.

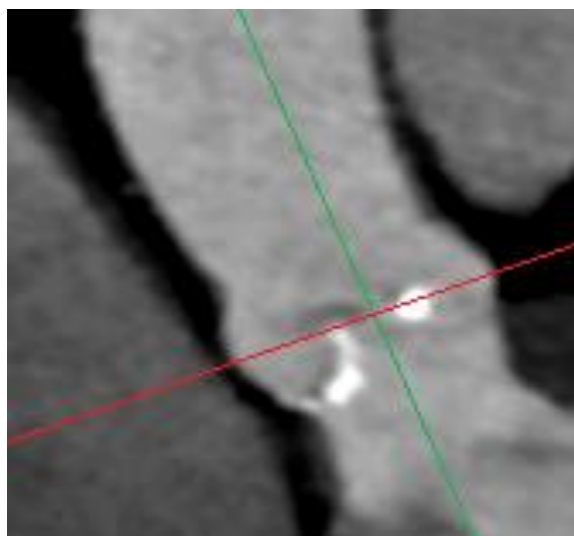


Рис. 3 а (Fig. 3 a)

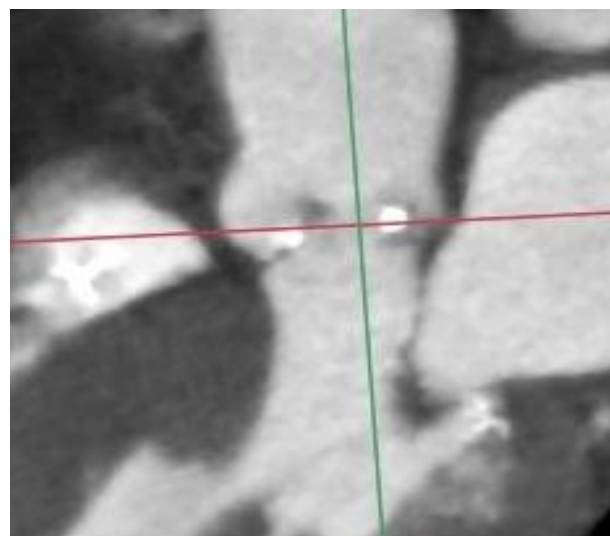


Рис. 3 б (Fig. 3 b)

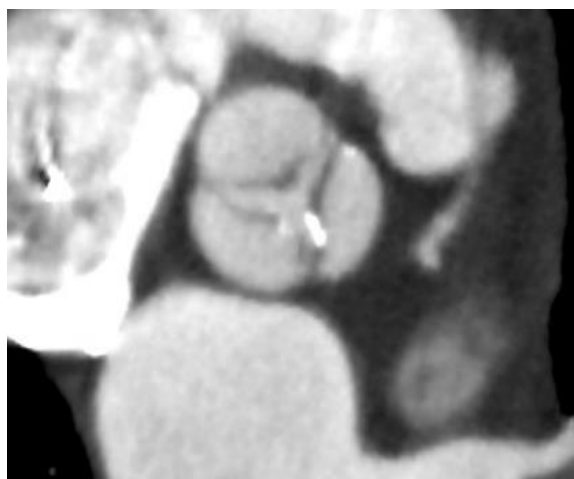


Рис. 3 в (Fig. 3 c)

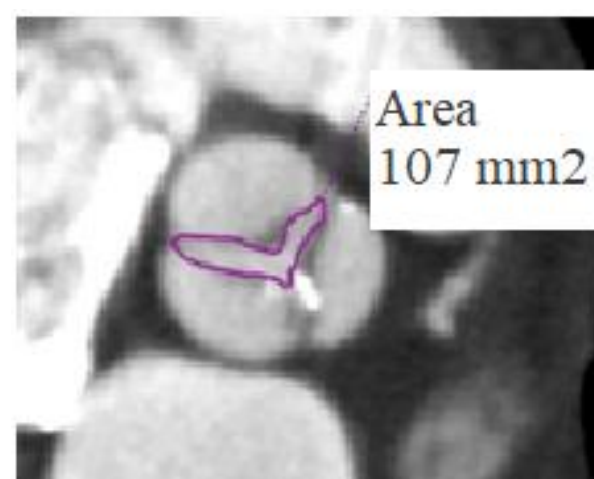


Рис. 3 г (Fig. 3 d)

Рис. 3. Выбор плоскости реконструкции КТ-изображений для измерения площади отверстия аортального клапана.

Выставляют взаимно перпендикулярные оси на уровне створок аортального клапана: А – фронтальная плоскость, Б – сагиттальная плоскость. В – последующее получение изображения аортального клапана по короткой оси. Г – короткая ось, выделение внутреннего контура створок с помощью инструмента ROI с автоматическим расчетом площади отверстия аортального клапана.

Fig. 3. Selection of the reconstruction plane of the CT images to measure the aortic valve area.

Mutually perpendicular axes at the level of the aortic valve leaflets are exposed: A – frontal plane, B – sagittal plane, C – subsequent imaging of the aortic valve along the short axis, D – short axis, selection of the inner contour of the flaps using the ROI tool with automatic calculation of the aortic valve orifice area..

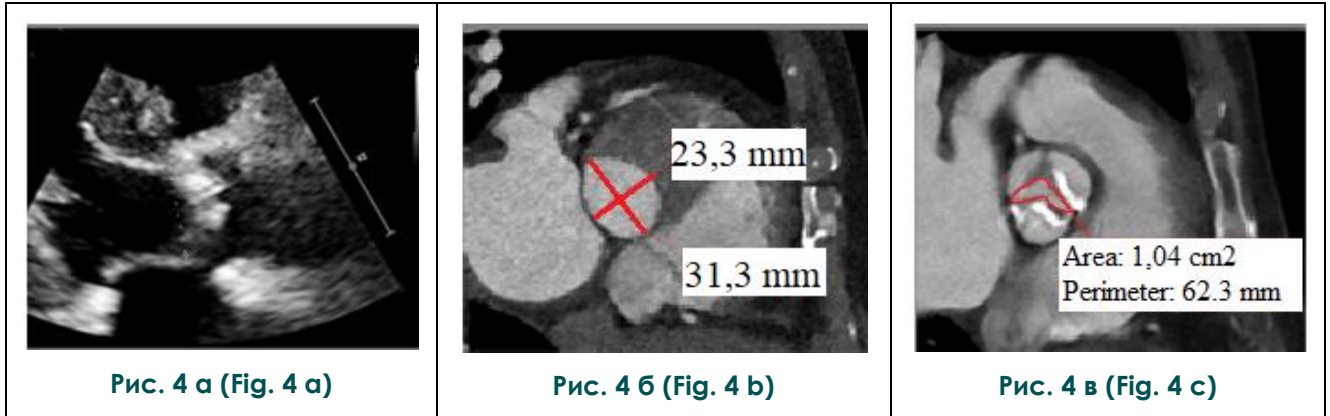


Рис. 4. Пример измерения площади отверстия аортального клапана с помощью Эхо-КГ (А) и КТ (Б, В) у мужчины 74 лет с тяжелым аортальным стенозом [14].

ПОАК – площадь отверстия аортального клапана, ПОАК_{КТплани} – КТ планиметрия аортального клапана.

Fig. 4. An example of measuring the area of the aortic valve opening using echocardiography (A) and CT (B, C) in a 74-year-old male who diagnosed with severe stenosis of aortic valve [14].

AVA – aortic valve area; AVA_{CTplani} – CT planimetry of aortic valve area.

Появляется все больше доказательств того, что наличие, степень и распространение кальциноза вдоль аортально-клапанного комплекса или «зоны посадки» протеза связаны с интра- и постпроцедурными осложнениями, включая парапротезную регургитацию, нарушения проводимости, неадекватное расширение баллона и последующую миграцию протеза, а также смещение нативных створок аортального клапана с последующей окклюзией устьев коронарных артерий [16]. Кроме этого, особое внимание уделяется поиску предикторов массивных кровотечений после процедуры ТИАК. В исследовании Felix-Oliveira A. было показано, что высокие значения аортального и илеофemorального кальциевого индекса являются независимыми предикторами интраоперационных и ранних постоперационных кровотечений [17]. Эти показатели могут быть интегрированы в оценку стратификации риска и использоваться при планировании ТИАК трансфemorальным доступом.

Заключение.

Список литературы:

1. Беляев С.А., Леонтьев С.А., Мор Ф.В. Транскатетерная имплантация аортального клапана. Креативная кардиология. 2015; 4: 25-33. doi:10.15275/kreatkard.2015.04.03.
2. Vahanian A., Beyersdorf F., Praz F. et al. ESC/EACTS Scientific Document Group. 2021 ESC/EACTS Guidelines for the management of valvular heart disease. Eur Heart J. 2022;43(7):561-632. doi: 10.1093/eurheartj/ehab395.
3. Веселова Т.Н., Ширкин А.В., Терновой С.К. и соавт.

Основной задачей КТ при планировании ТИАК является точное измерение размеров корня аорты для выбора протеза с оптимальными для каждого пациента параметрами.

Оценка геометрии аортально-клапанного комплекса должна проводиться в фазу систолы при максимальном растяжении фиброзного кольца. Для стандартизации измерений и сокращения времени постобработки изображений может использоваться полуавтоматическое программное обеспечение.

Количественная оценка степени аортального и илеофemorального кальциноза методом КТ позволяет проводить стратификацию риска интра- и постпроцедурных осложнений при планировании ТИАК.

Источник финансирования и конфликт интересов.

Авторы данной статьи подтвердили отсутствие финансовой поддержки исследования и конфликта интересов, о которых необходимо сообщить.

Компьютерная томография в оценке ранних постоперационных осложнений после транскатетерного протезирования аортального клапана. REJR 2023; 13(2):75-82. doi: 10.21569/2222-7415-2023-13-2-75-82.

4. Pawade T., Sheth T., Guzzetti E. et al. Why and How to Measure Aortic Valve Calcification in Patients With Aortic Stenosis. JACC Cardiovasc Imaging. 2019; 12(9):1835-1848. doi: 10.1016/j.jcmg.2019.01.045.
5. Коллев А.Е., Ромакина В.В., Коробкова И.З. и соавт.

Альвеолярный геморрагический синдром у пациентки с критическим аортальным стенозом и острым инфарктом миокарда. *REJR* 2021; 11(3):162-170. DOI: 10.21569/2222-7415-2021-11-3-162-170.

6. Francone M., Budde RPJ., Bremerich J. et al. CT and MR imaging prior to transcatheter aortic valve implantation: standardisation of scanning protocols, measurements and reporting—a consensus document by the European Society of Cardiovascular Radiology (ESCR). *EurRadiol.* 2020; 30(5):2627-2650. doi: 10.1007/s00330-019-06357-8.

7. Blanke P., Weir-McCall JR., Achenbach S. et al. Computed Tomography Imaging in the Context of Transcatheter Aortic Valve Implantation (TAVI)/Transcatheter Aortic Valve Replacement (TAVR): An Expert Consensus Document of the Society of Cardiovascular Computed Tomography. *JACC Cardiovasc Imaging.* 2019; 12(1):1-24. doi: 10.1016/j.jcmg.2018.12.003.

8. Renker M., Schoepf UJ., Kim WK. Combined CT Coronary Artery Assessment and TAVI Planning. *Diagnostics.* 2023; 13(7):1327. <https://doi.org/10.3390/diagnostics13071327>.

9. Horehledova B., Muhl C., Schwemmer C. et al. Aortic root evaluation prior to transcatheter aortic valve implantation - Correlation of manual and semi-automatic measurements. *PLoS One.* 2018; 13(6):e0199732. doi: 10.1371/journal.pone.0199732.

10. Steffen J., Beckmann M., Haum M. et al. Systolic or diastolic CT image acquisition for transcatheter aortic valve replacement – An outcome analysis. *Journal of Cardiovascular Computed Tomography.* 2022;16 (5): 423-430.

11. Horehledova B., Muhl C., Boswijk E. et al. Retrospectively

ECG-gated helical vs. non-ECG-synchronized high-pitch CTA of the aortic root for TAVI planning. *PLoS One.* 2020;15(5):e0232673. doi: 10.1371/journal.pone.0232673.

12. Astudillo P., Mortier P., Bosmans J. et al. Automatic Detection of the Aortic Annular Plane and Coronary Ostia from Multidetector Computed Tomography. *J IntervCardiol.* 2020; 2020:9843275. doi: 10.1155/2020/9843275.

13. Mittal TK., Reichmuth L., Bhattacharyya S. et al. Inconsistency in aortic stenosis severity between CT and echocardiography: prevalence and insights into mechanistic differences using computational fluid dynamics. *Open Heart.* 2019; 6(2):e001044. doi: 10.1136/openhrt-2019-001044.

14. Choe J., Koo HJ., Choi SJ. et al. Differences in aortic valve area measured on cardiac CT and echocardiography in patients with aortic stenosis. *PLoS One.* 2023; 18(1):e0280530. doi: 10.1371/journal.pone.0280530.

15. Pawade T., Clavel MA., Tribouilloy C. et al. Computed Tomography Aortic Valve Calcium Scoring in Patients With Aortic Stenosis. *CircCardiovasc Imaging.* 2018; 11(3):e007146. doi: 10.1161/CIRCIMAGING.117.007146.

16. Milo SM., Toia P., Midiri F. et al. Aortic valve and vascular calcium score in pre-TAVI CT: correlation with early post-procedural complications. *Radiol Med.* 2023; 128(3):299-306. doi: 10.1007/s11547-023-01603-y.

17. Felix-Oliveira A., Campante R., Ferreira A. et al. Vascular calcium score: new imaging tool for prediction of major and life-threatening bleeding events in trans-femoral TAVI. *European Heart Journal.* 2018; 39:2259. <https://doi.org/10.1093/eurheartj/ehy565.P2259>.

References:

1. Belyaev S.A., Leontiev S.A., Mor F.-V. Transcatheter implantation of the aortic valve. *Creative Cardiology.* 2015; 4: 25-33. doi:10.15275/kreatkard.2015.04.03 (in Russian).

2. Vahanian A., Beyersdorf F., Praz F. et al. ESC/EACTS Scientific Document Group. 2021 ESC/EACTS Guidelines for the management of valvular heart disease. *Eur Heart J.* 2022;12;43(7):561-632. doi: 10.1093/eurheartj/ehab395.

3. Veselova T.N., Shirkin A.V., Ternovoy S.K. et al. Computed tomography in the evaluation of early postoperative complications after transcatheter aortic valve replacement. *REJR* 2023;13(2):75-82. doi: 10.21569/2222-7415-2023-13-2-75-82 (in Russian).

4. Pawade T., Sheth T., Guzzetti E. et al. Why and How to Measure Aortic Valve Calcification in Patients With Aortic Stenosis. *JACC Cardiovasc Imaging.* 2019; 12(9): 1835-1848. doi: 10.1016/j.jcmg.2019.01.045.

5. Komlev A.E., Romakina V.V., Korobkova I.Z. et al. Diffuse alveolar haemorrhage in female patient with severe aortic stenosis and acute myocardial infarction. *REJR* 2021; 11(3):162-170. DOI: 10.21569/2222-7415-2021-11-3-162-170 (in Russian).

6. Francone M., Budde RPJ., Bremerich J. et al. CT and MR imaging prior to transcatheter aortic valve implantation: standardisation of scanning protocols, measurements and reporting—a consensus document by the European Society of Cardiovascular Radiology (ESCR). *EurRadiol.* 2020; 30(5): 2627-2650. doi: 10.1007/s00330-019-06357-8.

7. Blanke P., Weir-McCall JR., Achenbach S. et al. Computed Tomography Imaging in the Context of Transcatheter Aortic Valve Implantation (TAVI)/Transcatheter Aortic Valve Replacement (TAVR): An Expert Consensus Document of the Society of Cardiovascular Computed Tomography. *JACC Cardiovasc Imaging.* 2019; 12(1): 1-24. doi: 10.1016/j.jcmg.2018.12.003.

8. Renker M., Schoepf UJ., Kim WK. Combined CT Coronary Artery Assessment and TAVI Planning. *Diagnostics.* 2023; 13(7): 1327. <https://doi.org/10.3390/diagnostics13071327>.

9. Horehledova B., Muhl C., Schwemmer C. et al. Aortic root evaluation prior to transcatheter aortic valve implantation – Correlation of manual and semi-automatic measurements. *PLoS One.* 2018; 13(6): e0199732. doi: 10.1371/journal.pone.0199732.

10. Steffen J., Beckmann M., Haum M. et al. Systolic or diastolic CT image acquisition for transcatheter aortic valve replacement – An outcome analysis. *Journal of Cardiovascular Computed Tomography.* 2022;16 (5): 423-430.

11. Horehledova B., Muhl C., Boswijk E. et al. Retrospectively ECG-gated helical vs. non-ECG-synchronized high-pitch CTA of the aortic root for TAVI planning. *PLoS One.* 2020;15(5): e0232673. doi: 10.1371/journal.pone.0232673.

12. Astudillo P., Mortier P., Bosmans J. et al. Automatic Detection of the Aortic Annular Plane and Coronary Ostia from Multidetector Computed Tomography. *J IntervCardiol.* 2020; 2020: 9843275. doi: 10.1155/2020/9843275.

13. Mittal TK., Reichmuth L., Bhattacharyya S. et al. Inconsistency in aortic stenosis severity between CT and echocardiography: prevalence and insights into mechanistic differences using computational fluid dynamics. *Open Heart*. 2019; 6(2): e001044. doi: 10.1136/openhrt-2019-001044.
14. Choe J., Koo HJ., Choi SJ. et al. Differences in aortic valve area measured on cardiac CT and echocardiography in patients with aortic stenosis. *PLoS One*. 2023; 18(1): e0280530. doi: 10.1371/journal.pone.0280530.
15. Pawade T., Clavel MA., Tribouilloy C. et al. Computed Tomography Aortic Valve Calcium Scoring in Patients With Aortic Stenosis. *Circ Cardiovasc Imaging*. 2018; 11(3): e007146. doi: 10.1161/CIRCIMAGING.117.007146.
16. Milo SM., Toia P., Midiri F. et al. Aortic valve and vascular calcium score in pre-TAVI CT: correlation with early post-procedural complications. *Radiol Med*. 2023; 128(3): 299-306. doi: 10.1007/s11547-023-01603-y.
17. Felix-Oliveira A., Campante R., Ferreira A. et al. Vascular calcium score: new imaging tool for prediction of major and life-threatening bleeding events in trans-femoral TAVI. *European Heart Journal*. 2018; 39: 2259. <https://doi.org/10.1093/eurheartj/ehy565.P2259>.