

# АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ МЕТОД АНАЛИЗА ГЕОМЕТРИИ И ТОПОЛОГИИ ФИБРОЗНОГО КОЛЬЦА МИТРАЛЬНОГО КЛАПАНА

DOI: 10.17691/stm2016.8.2.03

УДК 616.126.42–089.844:392

Поступила 19.08.2015 г.



**В.Ю. Долгов**, младший научный сотрудник лаборатории новых биоматериалов отдела экспериментальной и клинической кардиологии;

**Е.А. Овчаренко**, научный сотрудник лаборатории новых биоматериалов отдела экспериментальной и клинической кардиологии;

**К.Ю. Клышников**, научный сотрудник лаборатории новых биоматериалов отдела экспериментальной и клинической кардиологии;

**И.Н. Сизова**, к.м.н., старший научный сотрудник лаборатории ультразвуковых и электрофизиологических методов диагностики отдела диагностики сердечно-сосудистых заболеваний;

**Ю.А. Кудрявцева**, д.б.н., зав. отделом экспериментальной и клинической кардиологии;

**Л.С. Барбараш**, д.м.н., профессор, академик РАН, главный научный сотрудник

НИИ комплексных проблем сердечно-сосудистых заболеваний, Кемерово, 650002, Сосновый б-р, 6

Дизайн протезов-колец для аннулопластики фиброзного кольца митрального клапана (ФКМК) развивался от интуитивного до основанного на теоретическом анализе геометрии и топологии при помощи современных технологий обработки и анализа изображений. В этой работе представлен автоматизированный метод обработки и анализа данных трехмерной эхокардиографии с последующей аппроксимацией результатов. Метод состоит из нескольких шагов. Сначала выполняется выделение границы из данных, полученных с помощью чреспищеводной трехмерной эхокардиографии. Затем производится прокрустово преобразование и поиск средней геометрии из имеющегося массива данных. Метод позволяет лучше анализировать геометрию ФКМК, создавать на основе полученных данных модели ФКМК и впоследствии использовать их для разработки дизайна протеза-кольца с целью сокращения количества возможных осложнений. Для оптимизации результатов методики использовали три метода аппроксимации: кусочно-кубический, единый полином и метод Гаусса–Фурье. Каждый из них обладает собственным уникальным набором преимуществ и недостатков, в зависимости от задачи можно использовать тот или иной метод при анализе и реконструкции геометрии ФКМК, что в итоге дает мощный инструмент для изучения ФКМК и моделирования протезов-колец.

**Ключевые слова:** митральный клапан; аннулопластика фиброзного кольца; геометрия фиброзного кольца; прокрустово преобразование.

**Как цитировать:** Dolgov V.Y., Ovcharenko E.A., Klyshnikov K.Y., Sizova I.N., Kudryavtseva Y.A., Barbarash L.S. Automated method to analyze geometry and topology of mitral valve fibrous ring. *Sovremennye tehnologii v medicine* 2016; 8(2): 22–30, <http://dx.doi.org/10.17691/stm2016.8.2.03>.

## English

## Automated Method to Analyze Geometry and Topology of Mitral Valve Fibrous Ring

**V.Y. Dolgov**, Junior Researcher, Laboratory of Novel Biomaterials, Department of Experimental and Clinical Cardiology;

**E.A. Ovcharenko**, Researcher, Laboratory of Novel Biomaterials, Department of Experimental and Clinical Cardiology;

**K.Y. Klyshnikov**, Research Fellow, Laboratory of Novel Biomaterials, Department of Experimental and Clinical Cardiology;

**I.N. Sizova**, MD, PhD, Senior Researcher, Laboratory of Ultrasound and Electrophysiological Diagnostic Techniques, Department of Cardiovascular Diseases Diagnostics;

**Для контактов:** Долгов Виктор Юрьевич, [dolgov.official@gmail.com](mailto:dolgov.official@gmail.com)

**Y.A. Kudryavtseva**, DSc, Head of the Department of Experimental and Clinical Cardiology;

**L.S. Barbarash**, MD, DSc, Professor, Academician of the Russian Academy of Sciences, Chief Researcher

Scientific Research Institute of Complex Problems of Cardiovascular Diseases, 6 Sosnovy Blvd., Kemerovo, 650002, Russian Federation

The design of prosthetic rings for the annuloplasty of mitral valve fibrous ring (MVFR) was developed from the intuitive to that based on the theoretical analysis of the geometry and topology using the modern technologies of image processing and analysis. The paper presents an automated method of three-dimensional echocardiography data processing and analysis followed by findings fitting. The technique includes several steps. At first, we detected the boundaries of the data obtained by transesophageal three-dimensional echocardiography followed by Procrustes analysis and the mean shape search based on the available data bulk. The method enables to analyze better MVFR geometry, develop MVFR models on the basis of the obtained data, and subsequently, use them to design a prosthetic ring in order to reduce the number of possible complications. Three approximation methods (piecewise cubic, general polynomial, Gauss–Fourier method) were applied for the optimization of the technique results. Each of the methods has its own unique set of advantages and disadvantages, and depending on the task, one can use a certain technique when analyzing or reconstructing MVFR geometry. Thus, it is a powerful tool for MVFR study and prosthetic ring modeling.

**Key words:** mitral valve; fibrous ring annuloplasty; fibrous ring geometry; Procrustes analysis.

Реконструкция митрального клапана (МК) путем аннулопластики фиброзного кольца митрального клапана (ФКМК) является «золотым стандартом» при лечении недостаточности МК [1]. Данная методика, впервые предложенная Аланом Карпантье в 1968 г., впоследствии широко вошла в кардиохирургическую практику [2]. Она позволяет достичь удовлетворительных клинических результатов в краткосрочном и среднесрочном периодах, однако существует ряд осложнений, ухудшающих отдаленный прогноз [3]. Наиболее распространенное из таких осложнений — паравальвулярная фистула [4]. Согласно проведенным исследованиям [5–7], ее основной причиной является отрыв кольца-протеза от ФКМК, который зачастую происходит вследствие несоответствия их геометрии из-за несовершенства дизайна протеза.

Развитие технологий ультразвуковой визуализации способствовало решению данной проблемы. В конце 1980-х гг. для анализа функции МК была впервые использована трехмерная эхокардиография [8], с помощью которой обнаружена седловидная форма ФКМК, заключающаяся в возвышении передней и задней створок относительно плоскости комиссур. В 2003 г. было показано влияние седловидной формы на напряжение, возникающее на створках, и, как следствие, на долговечность створчатого аппарата МК [9]. Это возобновило интерес к изучению анатомии ФКМК с использованием современных средств обработки изображений и проектирования [10]. Исследование геометрии и усовершенствование методологии анализа и моделирования ФКМК в совокупности с моделированием напряжений в створках клапана методом конечных элементов могут сделать значительный вклад в разработку кольца-протеза ФКМК нового поколения.

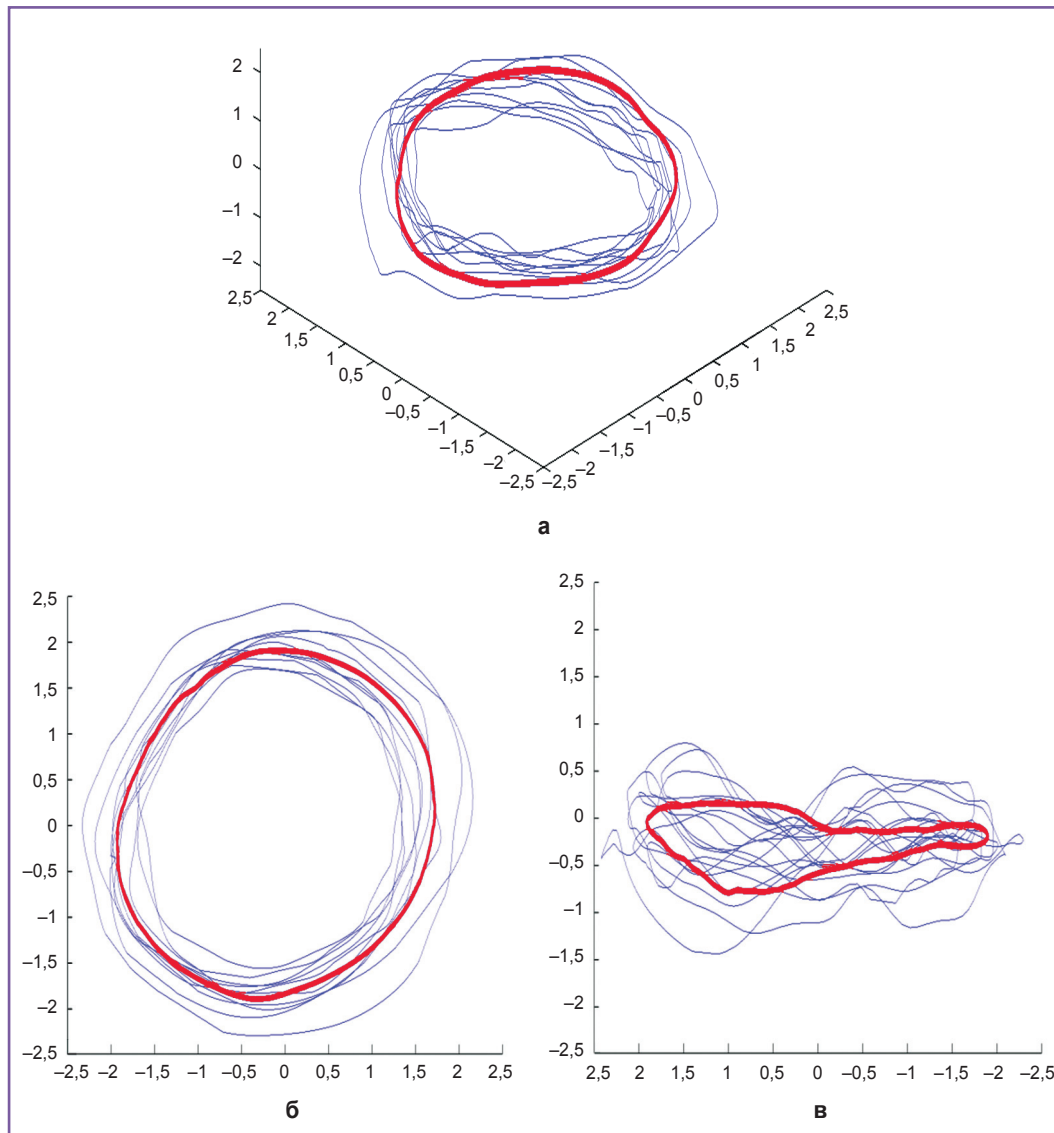
**Цель исследования** — разработка методики углубленного изучения анатомии фиброзного кольца митрального клапана по данным трехмерной

эхокардиографии, в основу которой положен оригинальный алгоритм расчета геометрии фиброзного кольца с помощью прокрустова преобразования и аппроксимации полученных данных различными методами.

**Материалы и методы.** Чреспищеводная трехмерная эхокардиография была выполнена 10 пациентам с ишемической болезнью сердца, не имеющим признаков поражения МК. Исследование проведено в соответствии с Хельсинкской декларацией (принятой в июне 1964 г. (Хельсинки, Финляндия) и пересмотренной в октябре 2000 г. (Эдинбург, Шотландия)) и одобрено Этическим комитетом НИИ комплексных проблем сердечно-сосудистых заболеваний. От каждого пациента получено информированное согласие.

Анализ данных был проведен как для периода изгнания систолической фазы, так и для периода наполнения диастолической фазы сердечного сокращения, которые соответствуют максимально закрытому и открытому состоянию МК. Данные получены с использованием программного обеспечения QLAB (Philips, Нидерланды) с дальнейшим экспортом в MATLAB R2015a (MathWorks, США) с целью последующей математической обработки.

Геометрия ФКМК каждого пациента была реконструирована с применением алгоритма выделения границы из массива исходных данных (рис. 1). Выделение границы производили таким образом, чтобы количество точек было одинаковым среди всех колец внутри группы. Сначала вычисляли количество точек, необходимое для максимально полного выделения границы из исходных трехмерных данных, потом из их числа выбирали наименьшее количество ( $n$ ). Затем на основе трехмерных данных остальных пациентов границу выделяли таким образом, чтобы количество точек было равно  $n$  путем снижения детализации выделения. Вычисление

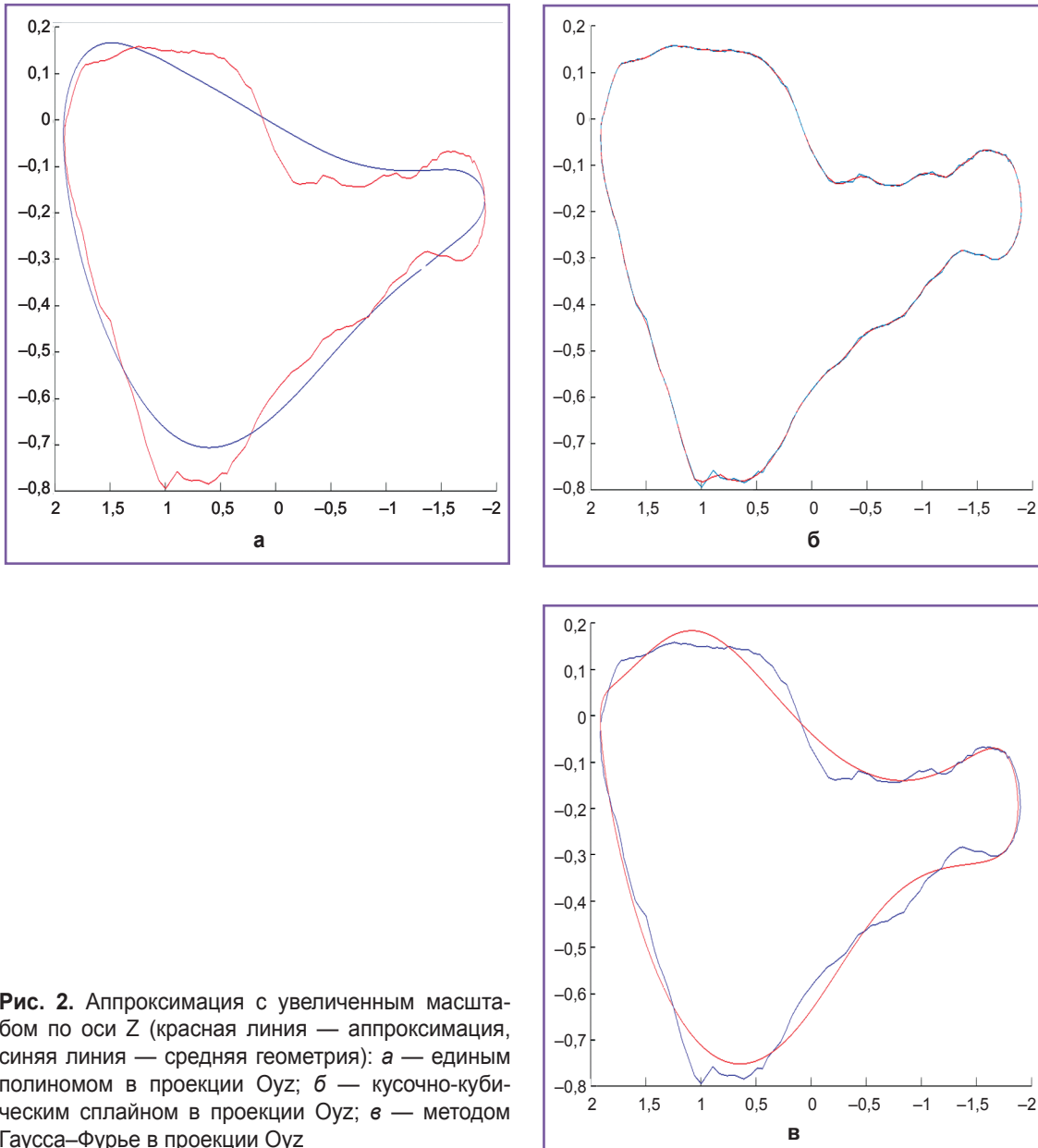


**Рис. 1.** Изображение средней линии (красный цвет), наложенной на изображения фиброзного кольца митрального клапана пациентов (синий цвет): а — изометрическая проекция; б — Оху-проекция; в — Оуз-проекция

средней геометрии ФКМК для каждой группы произведено путем поиска среднего арифметического координат соответствующих друг другу точек у всех пациентов. Центр масс для кольца был определен как точка, равноудаленная от всех точек в кольце. Наборы точек исходных данных были преобразованы так, чтобы их центры масс совпали. Затем кольца были повернуты таким образом, чтобы сумма квадратов расстояний до Оху-поверхности была наименьшей для каждого кольца в отдельности. После этого был выбран эталон, все кольца повернуты относительно него таким образом, чтобы сумма квадратов расстояний между соответствующими друг другу точками стала наименьшей. Далее в качестве эталона перебрали все кольца, и в итоге конечным эталоном выбрано кольцо, при

котором сумма квадратов расстояний между соответствующими друг другу точками, рассчитанная по всем остальным пациентам, являлась наименьшей. Затем полученную среднюю геометрию аппроксимировали кривой с использованием трех методов: 1) при помощи кусочно-кубических сплайнов; 2) при помощи одного полинома; 3) при помощи метода Гаусса–Фурье.

Для получения аппроксимирующей кривой (рис. 2) вычисляли периметр кольца, высоту кольца, точку, имеющую максимальную координату по оси Z, комиссуральный диаметр CW (commissural width), отношение высоты кольца к комиссуральному диаметру, двумерную и трехмерную площадь МК. Высоту кольца АН (annular height) определяли как разницу между максимальной и минимальной координатой

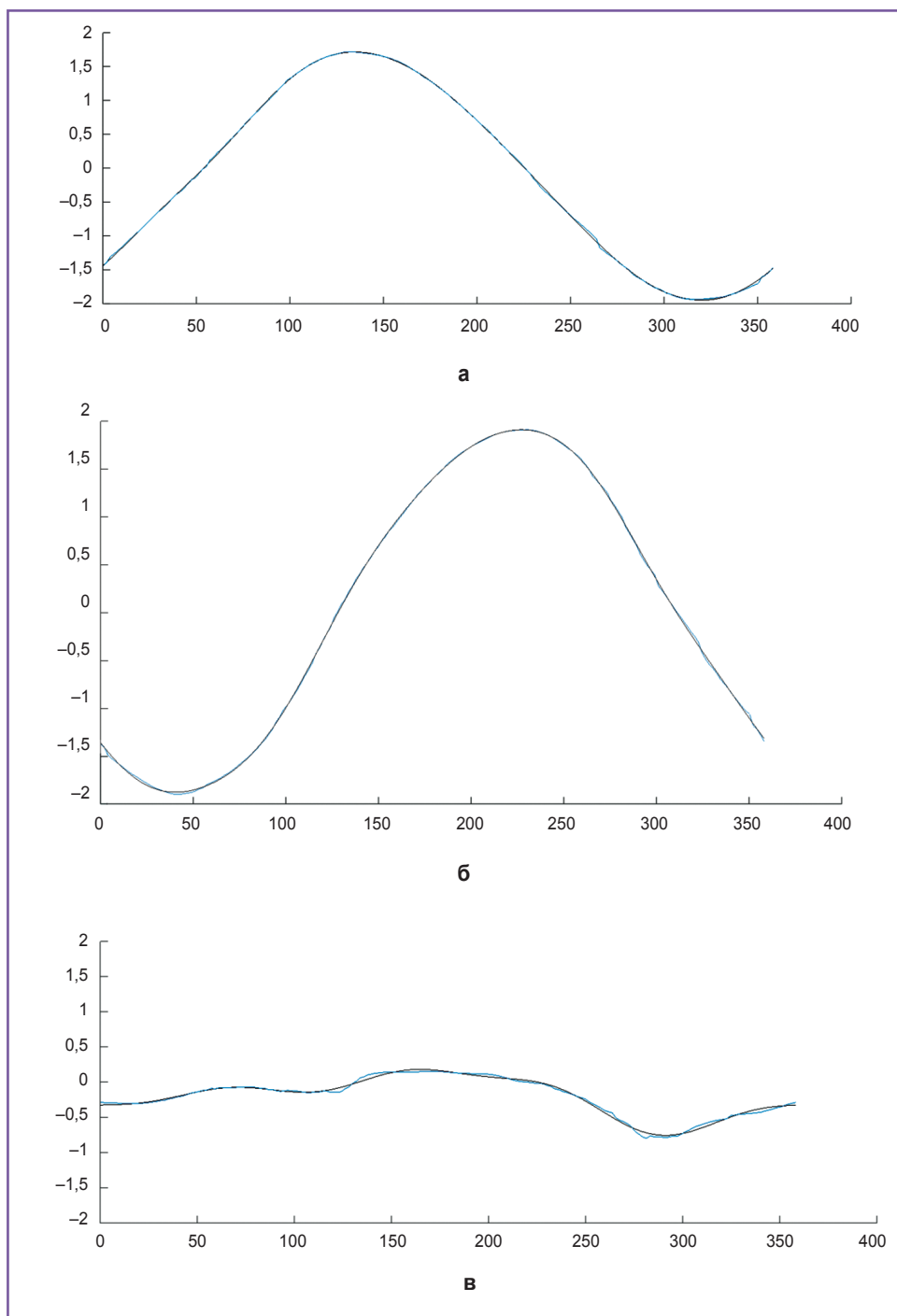


**Рис. 2.** Аппроксимация с увеличенным масштабом по оси Z (красная линия — аппроксимация, синяя линия — средняя геометрия): а — единым полиномом в проекции Oyz; б — кусочно-кубическим сплайном в проекции Oyz; в — методом Гаусса–Фурье в проекции Oyz

по оси Z, комиссуральный диаметр — как расстояние между комиссурами. С целью оценки степени планарности МК вычисляли отношение высоты кольца к комиссуральному диаметру АНСWR (annular height to commissural width ratio):  $АНСWR = 100\% \cdot АН / СW$ . Двухмерная площадь МК была вычислена как площадь проекции на поверхность Oxy, трехмерная — при помощи триангуляции исходных данных до выделения из них кольца. Описанные параметры были вычислены у каждого из 10 колец для периода изгнания систолической фазы и периода наполнения диастолической фазы сердечного сокращения. С целью описания результатов рассчитывали медиану, 95% доверительный интервал (95% ДИ) для медианы, 25-й и 75-й перцентили, наименьшее и наибольшее значения выборки.

Все перечисленные показатели для исходных кривых ФМК сравнивали с аналогичными показателями для аппроксимирующей кривой. Кроме того, сравнение всех показателей для исходных и аппроксимирующих кривых проведено как в период изгнания систолической фазы, так и в период наполнения диастолической фазы сердечного сокращения. В обоих случаях сравнение выполнялось при помощи критерия Манна–Уитни. Различия считались статистически значимыми при  $p < 0.05$ .

**Результаты и обсуждение.** Разработанный алгоритм выделения границы позволяет выделять наиболее информативный набор точек, а не фиксированный набор равноудаленных точек, как в работе [10]. Мы использовали обобщенное прокрустово преобразование, которое является современным

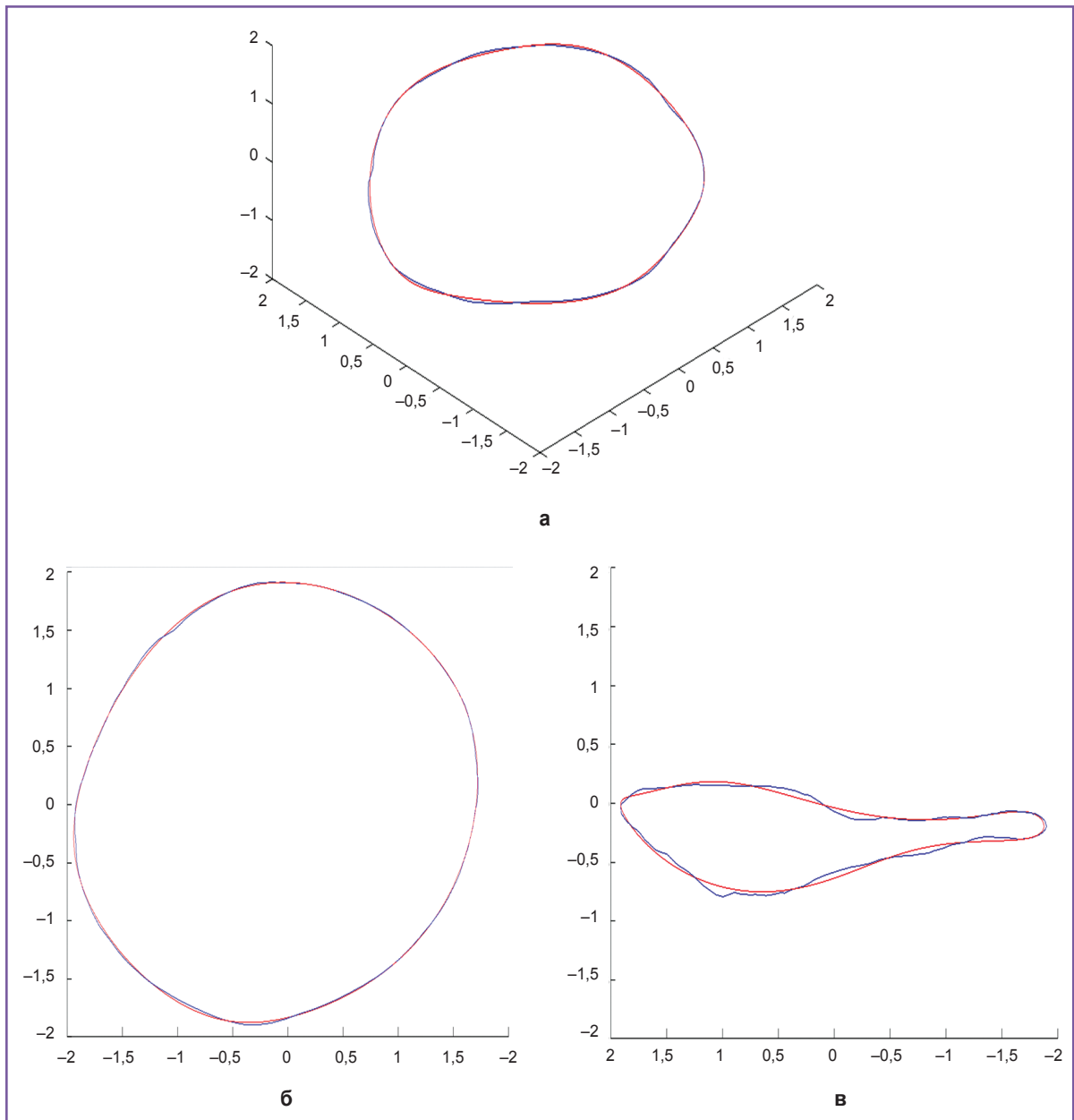


**Рис. 3.** Параметрическое представление метода Гаусса–Фурье (синяя линия — аппроксимация, черная линия — средняя геометрия): а — график  $X(t)$ ; б — график  $Y(t)$ ; в — график  $Z(t)$

способом анализа и обработки изображений. Кроме того, новизна подхода в нашем исследовании заключается еще и в автоматизированном вычислении средней геометрии ФМКК (см. рис. 1) с последующей аппроксимацией полученных данных различными методами (см. рис. 2). При помощи разработанного

метода становится возможным производить подробный и очень точный сравнительный анализ между средней геометрией фиброзного кольца у МК с патологиями и без.

Анализ результатов трех методов аппроксимации, примененных в рамках данного исследования, пока-



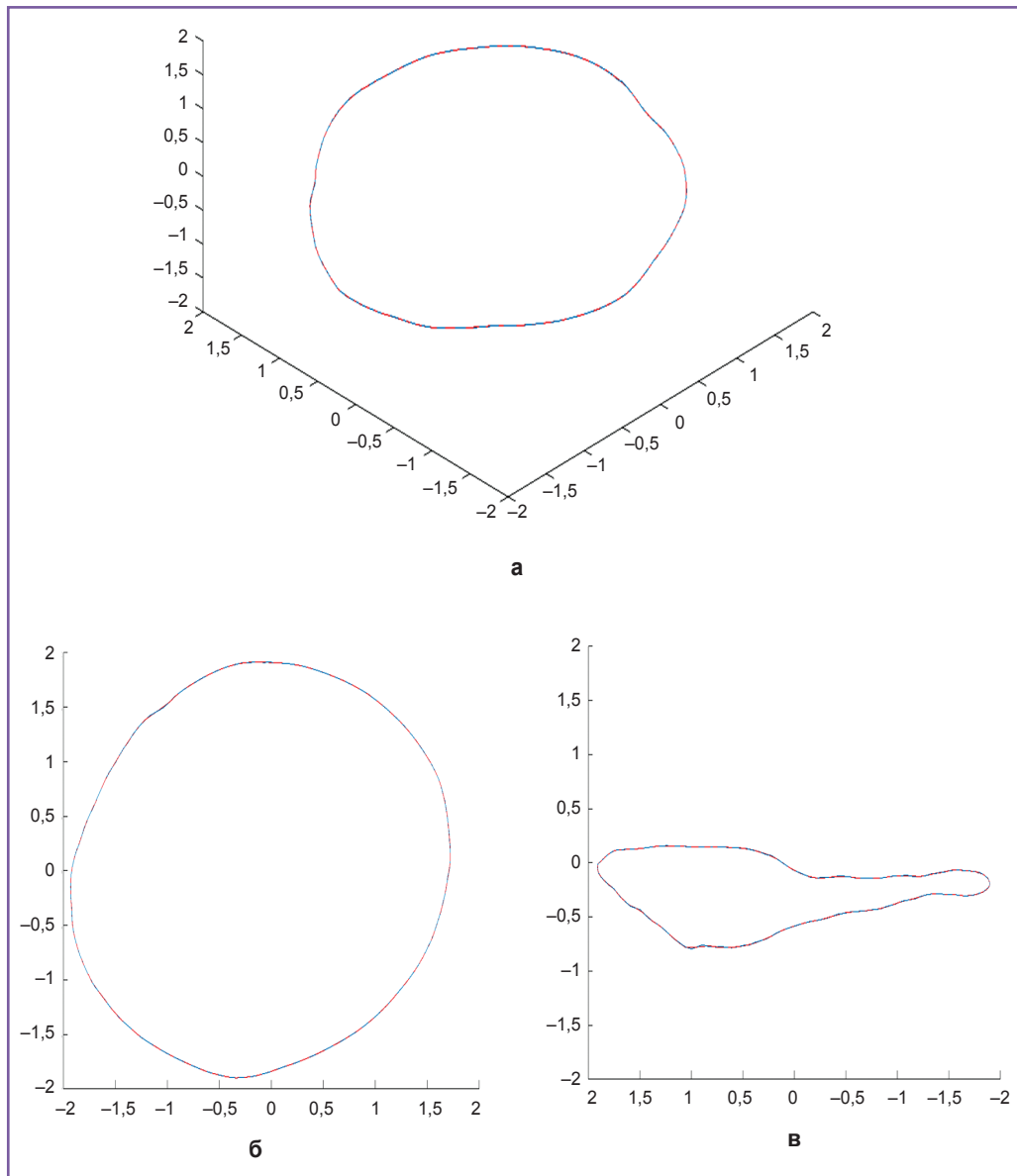
**Рис. 4.** Аппроксимация методом Гаусса–Фурье (красная линия — аппроксимация; синяя линия — средняя геометрия): а — изометрическая проекция; б —  $Oxy$ -проекция; в —  $Oyz$ -проекция

зал, что с их помощью можно достичь более высокой точности расчетов в сравнении с методом, описанным в работе [10].

При аппроксимации методом Гаусса–Фурье (рис. 3, 4) была получена кривая с наименьшим количеством коэффициентов, посредством которых можно восстановить сам интерполянт, не прибегая к использованию специализированного программного обеспечения или специфических навыков, но метод имеет самую низкую максимальную точность и долгое время работы при большом количестве входных данных.

Наиболее популярный на сегодняшний день метод кусочно-кубической аппроксимации (рис. 5) позволяет достичь наивысшей точности, но возникает относительно большое количество коэффициентов аппроксимации, ведущее к осложнениям при воспроизведении в сторонних программах обработки массивов данных и системах автоматизированного проектирования (САПР-системах).

Также был использован метод аппроксимации единым полиномом (рис. 6). Данный метод имеет менее громоздкую форму, хорошо известные свойства, и его использование в дальнейших вычислениях



**Рис. 5.** Аппроксимация кусочно-кубическим сплайном (красная линия — аппроксимация, синяя линия — средняя геометрия): а — изометрическая проекция; б — Оху-проекция; в — Оуз-проекция

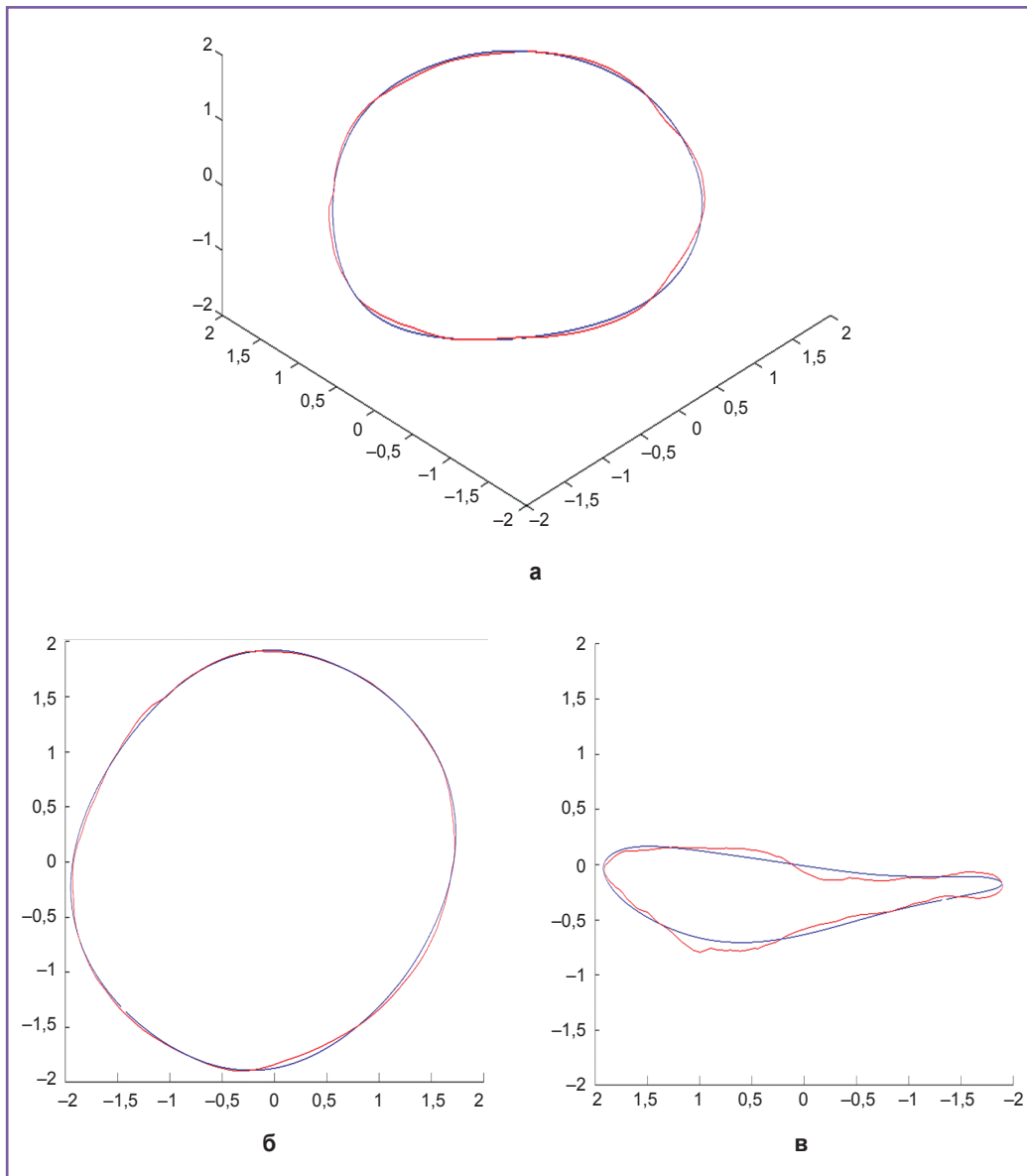
ях является наиболее простым. Однако он обладает высокой осцилляцией, плохой экстраполяцией и плохим качеством приближения на границах участка аппроксимации.

Полученные результаты свидетельствуют, что в зависимости от задачи и требований к результатам при анализе и реконструкции геометрии ФКМК можно использовать тот или иной метод аппроксимации. С целью достижения необходимой точности имеется также возможность варьирования параметров аппроксимации.

Сравнение полученных кривых (табл. 1–3) позволило выявить статистически значимые различия по периметру, высоте кольца, отношению высоты

кольца к комиссуральному диаметру (АНСWR) и отсутствие статистически значимых различий по таким показателям, как митральный комиссуральный диаметр, двухмерная и трехмерная площадь МК. На основании этого можно сделать вывод, что при переходе из систолы в диастолу значительные изменения происходят только по периметру, высоте кольца и АНСWR.

Данный метод сравнения геометрии и топологии в дальнейшем можно использовать для анализа геометрических различий ФКМК при разных патологиях. Полученные данные дают возможность создавать новое поколение протезов-колец с более совершенным учетом всех особенностей геометрии ФКМК.



**Рис. 6.** Аппроксимация единым полиномом (красная линия — аппроксимация, синяя линия — средняя геометрия): а — изометрическая проекция; б — Оху-проекция; в — Оуз-проекция

Таблица 1

**Сравнение медианы исходных данных с соответствующими параметрами средней линии и аппроксимирующих кривых в период изгнания систолической фазы**

Параметры для построения кривой	Периметр, мм	Трехмерная площадь, мм <sup>2</sup>	Двухмерная площадь, мм <sup>2</sup>	Высота, мм	Комиссуральный диаметр, мм	АНСWR
Медиана	11,624	20,910	9,256	0,714	3,671	0,199
Средняя линия	11,970	22,51	10,601	0,520	3,861	0,135
Аппроксимация кусочно-кубическим сплайном	11,934	23,404	10,596	0,510	3,862	0,132
Аппроксимация единым полиномом	11,906	22,042	10,595	0,422	3,921	0,108
Аппроксимация методом Гаусса–Фурье	11,844	22,098	10,596	0,440	3,857	0,114



Таблица 2

Сравнение медианы исходных данных с соответствующими параметрами средней линии и аппроксимирующих кривых в период наполнения диастолической фазы

Параметры для построения кривой	Периметр, мм	Трехмерная площадь, мм <sup>2</sup>	Двухмерная площадь, мм <sup>2</sup>	Высота, мм	Комиссуральный диаметр, мм	AHCWR
Медиана	12,851	21,632	8,786	0,887	3,606	0,246
Средняя линия	11,018	18,938	8,384	0,827	3,536	0,234
Аппроксимация кусочно-кубическим сплайном	11,009	18,937	8,382	0,826	3,535	0,234
Аппроксимация единым полиномом	11,338	19,822	8,397	0,760	3,533	0,215
Аппроксимация методом Гаусса–Фурье	10,968	23,923	8,380	0,809	3,535	0,229

Таблица 3

Результаты сравнения показателей (p) для исходных кривых в период изгнания систолической фазы и в период наполнения диастолической фазы при помощи критерия Вилкоксона

Периметр	Трехмерная площадь	Двухмерная площадь	Высота кольца	Комиссуральный диаметр	AHCWR
0,053	0,007	0,026	0,570	0,045	0,121

**Заключение.** Автоматизированный метод обработки и анализа данных трехмерной эхокардиографии с последующей аппроксимацией результатов позволяет быстро и точно рассчитать геометрию фиброзного кольца митрального клапана. Он дает возможность использования для анализа различий между средней формой фиброзного кольца и формой при наличии и отсутствии патологии митрального клапана. Применение данного метода может оказать существенное влияние при разработке нового поколения колец-протезов.

**Финансирование исследования и конфликт интересов.** Исследование не финансировалось какими-либо источниками, и конфликты интересов, связанные с данным исследованием, отсутствуют.

#### Литература/References

1. Andreas M., Doll N., Livesey S., Castella M., Kocher A., Casselman F., Voth V., Bannister C., Encalada Palacios J.F., Pereda D., Laufer G., Czesla M. Safety and feasibility of a novel adjustable mitral annuloplasty ring: a multicentre European experience. *Eur J Cardiothorac Surg* 2016; 49(1): 249–254. <http://dx.doi.org/10.1093/ejcts/ezv015>.
2. Carpentier A. Reconstructive valvuloplasty. A new technique of mitral valvuloplasty. *Presse Med* 1969; 77(7): 251–253.
3. Lee L.S., Kwon M.H., Cevasco M., Schmitto J.D., Mokashi S.A., McGurk S., Cohn L.H., Bolman R.M. 3rd, Chen F.Y. Postoperative recurrence of mitral regurgitation after annuloplasty for functional mitral regurgitation. *Ann Thorac Surg* 2012; 94(4): 1211–1216. <http://dx.doi.org/10.1016/j.athoracsur.2012.05.005>.
4. García E., Sandoval J., Unzué L., Hernandez-Antolin R.,

Almería C., Macaya C. Paravalvular leaks: mechanisms, diagnosis and management. *EuroIntervention* 2012; 8(Suppl Q): Q41–Q52. <http://dx.doi.org/10.4244/EIJV8SQA9>.

5. Tsuneto A., Eishi K., Miura T., Tanigawa K., Matsukuma S., Minami T., Koide Y., Ikeda S., Kawano H., Maemura K. Comparison of saddle-shape flexibility and elliptical-shape stability between Cosgrove-Edwards and Memo-3D annuloplasty rings using three-dimensional analysis software. *Gen Thorac Cardiovasc Surg* 2016 Apr 6. <http://dx.doi.org/10.1007/s11748-016-0645-0>. [Epub ahead of print].

6. Carpentier A. Mitral valve annuloplasty. *Ann Thorac Surg* 1990; 49(3): 508–509. [http://dx.doi.org/10.1016/0003-4975\(90\)90277-d](http://dx.doi.org/10.1016/0003-4975(90)90277-d).

7. Owais K., Montealegre-Gallegos M., Jeganathan J., Matyal R., Khabbaz K.R., Mahmood F. Dynamic changes in the ischemic mitral annulus: implications for ring sizing. *Ann Card Anaesth* 2016; 19(1): 15–19. <http://dx.doi.org/10.4103/0971-9784.173014>.

8. Bayramoğlu A., Taşolar H., Otlu Y.Ö., Hidayet Ş., Kurt F., Doğan A., Pekdemir H. Assessment of left atrial volume and mechanical functions using real-time three-dimensional echocardiography in patients with mitral annular calcification. *Anatol J Cardiol* 2016; 16(1): 42–47. <http://dx.doi.org/10.5152/akd.2015.5897>.

9. Salgo I.S., Gorman J.H. 3rd, Gorman R.C., Jackson B.M., Bowen F.W., Plappert T., St John Sutton M.G., Edmunds L.H. Jr. Effect of annular shape on leaflet curvature in reducing mitral leaflet stress. *Circulation* 2003; 106(6): 711–717. <http://dx.doi.org/10.1161/01.cir.0000025426.39426.83>.

10. Pouch A.M., Vergnat M., McGarvey J.R., Ferrari G., Jackson B.M., Sehgal C.M., Yushkevich P.A., Gorman R.C., Gorman J.H. 3rd. Statistical assessment of normal mitral annular geometry using automated 3D echocardiographic analysis. *Ann Thorac Surg* 2014; 97(1): 71–77. <http://dx.doi.org/10.1016/j.athoracsur.2013.07.096>.