

## Численная оценка анатомии фиброзного кольца митрального клапана в норме и при патологии по данным трехмерной эхокардиографии

### Для корреспонденции:

Кирилл Юрьевич Клышников, [klyshnikovk@gmail.com](mailto:klyshnikovk@gmail.com)

Поступила в редакцию 5 ноября 2020 г.

Исправлена 12 декабря 2020 г.

Принята к публикации 22 декабря 2020 г.

### Цитировать:

Овчаренко Е.А., Клышников К.Ю., Сизова И.Н., Кондюкова Н.В., Барбараш Л.С. Численная оценка анатомии фиброзного кольца митрального клапана в норме и при патологии по данным трехмерной эхокардиографии. *Патология кровообращения и кардиохирургия*. 2021;25(2):50-59.  
<http://dx.doi.org/10.21688/1681-3472-2021-2-50-59>

### Финансирование

Исследование выполнено за счет гранта «Метод персонализированной реконструкции фиброзного кольца клапана сердца при ишемической митральной регургитации (внутренний номер МК-1891.2020.7)» Совета по грантам Президента Российской Федерации № 075-15-2020-067.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### Вклад авторов

Концепция и дизайн работы: Е.А. Овчаренко, Л.С. Барбараш

Сбор и анализ данных: К.Ю. Клышников, И.Н. Сизова, Н.В. Кондюкова

Статистическая обработка данных: К.Ю. Клышников

Написание статьи: Е.А. Овчаренко, К.Ю. Клышников

Исправление статьи: Е.А. Овчаренко, К.Ю. Клышников, И.Н. Сизова, Н.В. Кондюкова

Утверждение окончательного варианта статьи: все авторы

### Е.А. Овчаренко, К.Ю. Клышников, И.Н. Сизова, Н.В. Кондюкова, Л.С. Барбараш

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Научно-исследовательский институт комплексных проблем сердечно-сосудистых заболеваний», Кемерово, Российская Федерация

**Цель.** Анализ особенностей геометрии и динамики фиброзного кольца митрального клапана в норме, при митральной регургитации дегенеративной и ишемической этиологии на основе трехмерной эхокардиографии с последующей математической обработкой.

**Методы.** В исследование включили данные трансэзофагеальной трехмерной эхокардиографии 50 пациентов, распределенных в 3 группы: дегенеративная митральная регургитация ( $n = 10$ ), ишемическая митральная регургитация ( $n = 10$ ), отсутствие патологии митрального клапана ( $n = 30$ ). Трансэзофагеальную эхокардиографию осуществляли на установке iE33 (Philips, США), количественно анализируя передне-задний диаметр; переднебоковой-заднесрединный диаметр; межкомиссуральный диаметр; трехмерную длину окружности митрального клапана; двумерную высоту зоны коаптации; высоту створок; максимальную высоту; передний и задний углы створок; угол непланарности; коэффициент планарности; коэффициент эллиптичности. Измерения проводили для обеих фаз сердечного цикла: периода изгнания систолы и периода наполнения диастолы, что соответствует закрытому и открытому состояниям клапана. Полученные данные обрабатывали в программе QLAB (Philips, США), с помощью которой получали наборы точек, описывающих геометрию митрального клапана. После чего с использованием in-house алгоритма в среде MATLAB R2015a (MathWorks, Массачусетс, США) получали математические модели анатомии фиброзного кольца для каждой из групп.

**Результаты.** Функциональное исследование митрального клапана демонстрирует схожий характер изменений геометрических особенностей фиброзного кольца для обеих патологий. Динамические показатели работы фиброзных колец в цикле «систола – диастола» значительно различались в трех группах. Представлены уравнения усредненных моделей фиброзных колец анализируемых групп, которые могут быть использованы для проектирования, верификации и компьютерного моделирования.

#### ORCID ID

Е.А. Овчаренко, <https://orcid.org/0000-0001-7477-3979>  
К.Ю. Клышников, <https://orcid.org/0000-0003-3211-1250>  
И.Н. Сизова, <https://orcid.org/0000-0001-8076-8746>  
Н.В. Кондюкова, <https://orcid.org/0000-0002-3416-1860>  
Л.С. Барбараш, <https://orcid.org/0000-0002-2814-4300>

© Е.А. Овчаренко, К.Ю. Клышников, И.Н. Сизова,  
Н.В. Кондюкова, Л.С. Барбараш, 2021  
Статья открытого доступа, распространяется по лицензии  
Creative Commons Attribution 4.0.

#### Введение

Заболевания митрального клапана (МК) — второй по распространенности тип клапанных пороков сердца, который охватывает до 3 % населения развитых стран [1]. Основное проявление поражений МК — митральная регургитация (МР). Выделяют четыре основных вида МР: дегенеративная (ДМР), ишемическая (ИМР), инфекционного и ревматического генеза, среди которых наиболее распространены первая и вторая формы.

ДМР охватывает около 2 % популяции и вызвана пролапсом створчатого аппарата вследствие элонгации и / или разрыва хорд, приводящим к нарушениям запирающей функции. Тактика ведения таких пациентов зависит от тяжести МР: функции левого желудочка, размеров камер сердца, наличия дилатации и фибрилляции предсердия [1], высокой легочной гипертензии [2]. Хотя протезирование МК при ДМР широко распространено (до 69 % вмешательств) [3], пластика МК более эффективна в снижении летальности и увеличении долгосрочной выживаемости пациентов [4]. Существенные недостатки полного протезирования — необходимость пожизненного приема антикоагулянтов и высокий риск повторного вмешательства. Оба фактора нивелируются использованием транскатетерных протезов, однако пока такая методика не распространена за пределами клинических испытаний [5]. Таким образом, клапаносохраняющие вмешательства предпочтительны для данных пациентов.

ИМР — наиболее распространенное проявление МР, включающее как глобальное, так и локальное ремоделирование, нарушение функции и геометрии МК, а также подклапанных структур, что в совокупности определяет негативный прогноз

**Заключение.** Патологические изменения геометрии митрального клапана при ишемической и дегенеративной регургитации носят схожий характер, несмотря на этиологические различия. Однако данные патологии различаются при изменении геометрии в динамике «систола – диастола», что обуславливает необходимость использовать разные подходы и устройства для их коррекции.

**Ключевые слова:** дегенерация; ишемия; митральный клапан; регургитация; трехмерная чреспищеводная эхокардиография

для пациента. Ограниченная подвижность створок, вызванная дис- или акинезией стенки желудочка и папиллярных мышц, влечет за собой чрезмерное натяжение хорд и возникновение пролапса. Клинические результаты протезирования МК и его пластики в случае ИМР разрозненны и не позволяют говорить об однозначном преимуществе того или иного подхода [6–8]. Тем не менее широкое применение реконструктивных (аннулопластических) вмешательств свидетельствует об их эффективности при ишемической митральной регургитации.

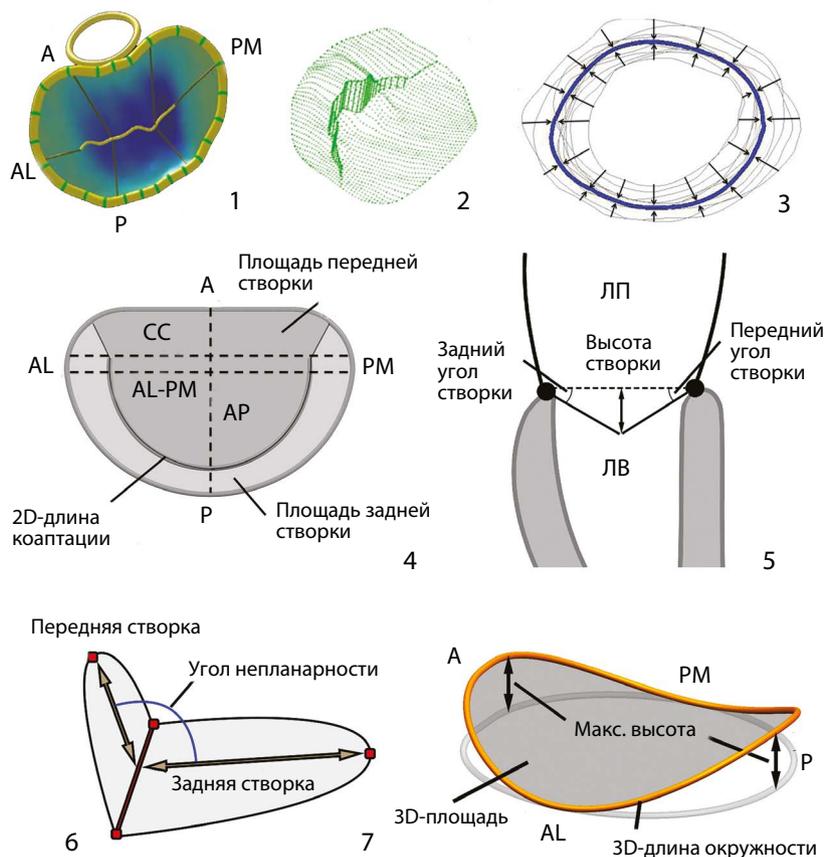
Вмешательства при ИМР и ДМР направлены на восстановление запирающей функции створчатого аппарата за счет коррекции геометрии как фиброзного кольца (ФК), так и подклапанного аппарата [9]. Однако, несмотря на положительные результаты использования колец для аннулопластики, у 5–10 % пациентов с ДМР и 30 % с ИМР возникает повторная регургитация [8; 10; 11] вследствие развития паравальвулярной фистулы в результате отрыва манжеты от ФК [12; 13]. Предположительно первичной причиной таких событий является нефизиологичная форма колец для аннулопластики [13], что косвенно обуславливает отсутствие опорных колец, полностью удовлетворяющих потребителей-хирургов [2]. С учетом комплексной трехмерной геометрии и высокой подвижности МК разработка и оптимизация устройств для клапаносохраняющих вмешательств требуют глубокого понимания анатомии и динамики МК как в норме, так и при патологиях.

Цель настоящего исследования — анализ особенностей геометрии и динамики ФК МК в норме, при МР дегенеративной и ишемической этиологии на основе трехмерной эхокардиографии с последующей математической обработкой.

**Рис. 1.** Этапы анализа анатомии фиброзного кольца митрального клапана:

1 — определение геометрии митрального клапана в программе QLAB;  
 2 — выделение облака точек, описывающих геометрию митрального клапана;  
 3 — усреднение точек, описывающих фиброзное кольцо, для получения математических моделей;  
 4 — описание анализируемых параметров на трехмерной эхокардиографии: переднебоковой-заднесрединный диаметр; передне-задний диаметр; межкомиссуральный диаметр; площадь передней створки; площадь задней створки; 2D-длина зоны коаптации (периметр);  
 5 — передний и задний углы, высота створки;  
 6 — угол непланарности;  
 7 — максимальная высота митрального клапана; 3D-длина окружности (периметр); 3D-площадь, описывающая митральный клапан

*Примечание.* AL-PM — переднебоковой-заднесрединный диаметр; AP — передне-задний диаметр; CC — межкомиссуральный диаметр; ЛП — левое предсердие; ЛВ — легочная ветвь.



## Методы

### Группы исследования

В ретроспективный анализ результатов трансэзофагеальной эхокардиографии МК включили обезличенные данные 50 пациентов, разделенных на 3 группы по клиническому диагнозу: 10 пациентов с ДМР, 10 — с ИМР и 30 — без патологии МК, проходивших исследование по другим причинам (норма). Исследование выполнено в соответствии со стандартами надлежащей клинической практики и принципами Хельсинкской декларации и одобрено локальным этическим комитетом ФГБНУ «НИИ КПССЗ» (протокол № 99 от 24.10.2014 г.).

### Трехмерная эхокардиография

Всем пациентам в период с октября 2014 г. по май 2015 г. в ФГБНУ «НИИ КПССЗ» провели трансэзофагеальную трехмерную эхокардиографию с последующей обработкой данных в программе QLAB (Philips, США) [14]. Трехмерную эхокардиографию осуществляли на установке экспертного уровня iE33

(Philips, США) датчиком X7-2t (2–7 МГц). Трехмерное изображение МК получали в режиме 3D zoom для одного цикла работы сердца с частотой 5–18 кадров. Затем оператор-эксперт вручную выделял линию ФК, створок и зоны коаптации (рис. 1). Трехмерный анализ геометрических параметров МК осуществляли в программе MVQ, QLAB (Philips, США) следующим образом: на кадре, соответствующем необходимой фазе, выделяли передний, задний, переднебоковой и заднесрединный участки МК; точки, соответствующие ФК, надир створок и границы зоны коаптации. Далее определяли (рис. 1):

- 1) передне-задний диаметр; переднебоковой-заднесрединный диаметр; межкомиссуральный диаметр;
- 2) передний и задний углы створок;
- 3) угол непланарности;
- 4) трехмерную длину окружности МК; двумерную высоту зоны коаптации; высоту створок; максимальную высоту;
- 5) коэффициент планарности как отношение максимальной высоты к большему диаметру эллипса митрального клапана;
- 6) коэффициент эллиптичности как отношение малого диаметра эллипса МК к большему.

Анализ осуществляли для обеих фаз сердечного цикла: периода изгнания систолы и периода наполнения диастолы, что соответствует закрытому и открытому состояниям митрального клапана.

### Математическая модель фиброзного кольца

На основании полученных в среде QLAB точек, описывающих геометрию МК, построили типовые пространственные модели ФК для групп ДМР, ИМР и нормы следующим образом (рис. 1):

1. Из исходных файлов трехмерной эхокардиографии выделили наборы точек, характеризующих МК, створки, зону коаптации каждого пациента.

2. Полученные координаты обработали, используя собственный алгоритм в среде MATLAB R2015a (MathWorks, Массачусетс, США) [15]. Определили центр масс — точку, равноудаленную от всех точек контура кольца. Наборы точек исходных данных преобразовали так, чтобы центры масс совпали. Затем кольца повернули таким образом, что сумма квадратов расстояний до ОХУ-поверхности была наименьшей для каждого кольца в отдельности. Кольца последовательно повернули друг относительно друга так, чтобы минимизировать среднеквадратичную ошибку и привести геометрию к одинаковой ориентации. Полученные массивы взаимно ориентированных точек усреднили, используя глобальную полиномиальную функцию. Получили уравнения, описывающие геометрию ФК,

которые в дальнейшем могут быть использованы как при разработке колец-протезов, так и при исследовании митрального клапана.

Общий вид параметрического уравнения:

$$f = a_0 + a_{n+1} \times \cos(2 \times \text{Pi} \times (n+1) \times x / 360) + \sum_{i=1}^n (a_i \times \cos(2 \times \text{Pi} \times n_i \times x / 360) + b_i \times \sin(2 \times \text{Pi} \times n_i \times x / 360)),$$

где  $a_0, a_{n+1}, a_i, b_i$  — коэффициенты полинома, описывающего трехмерную геометрию фиброзного кольца,  $\text{Pi}$  — число пи (рад).

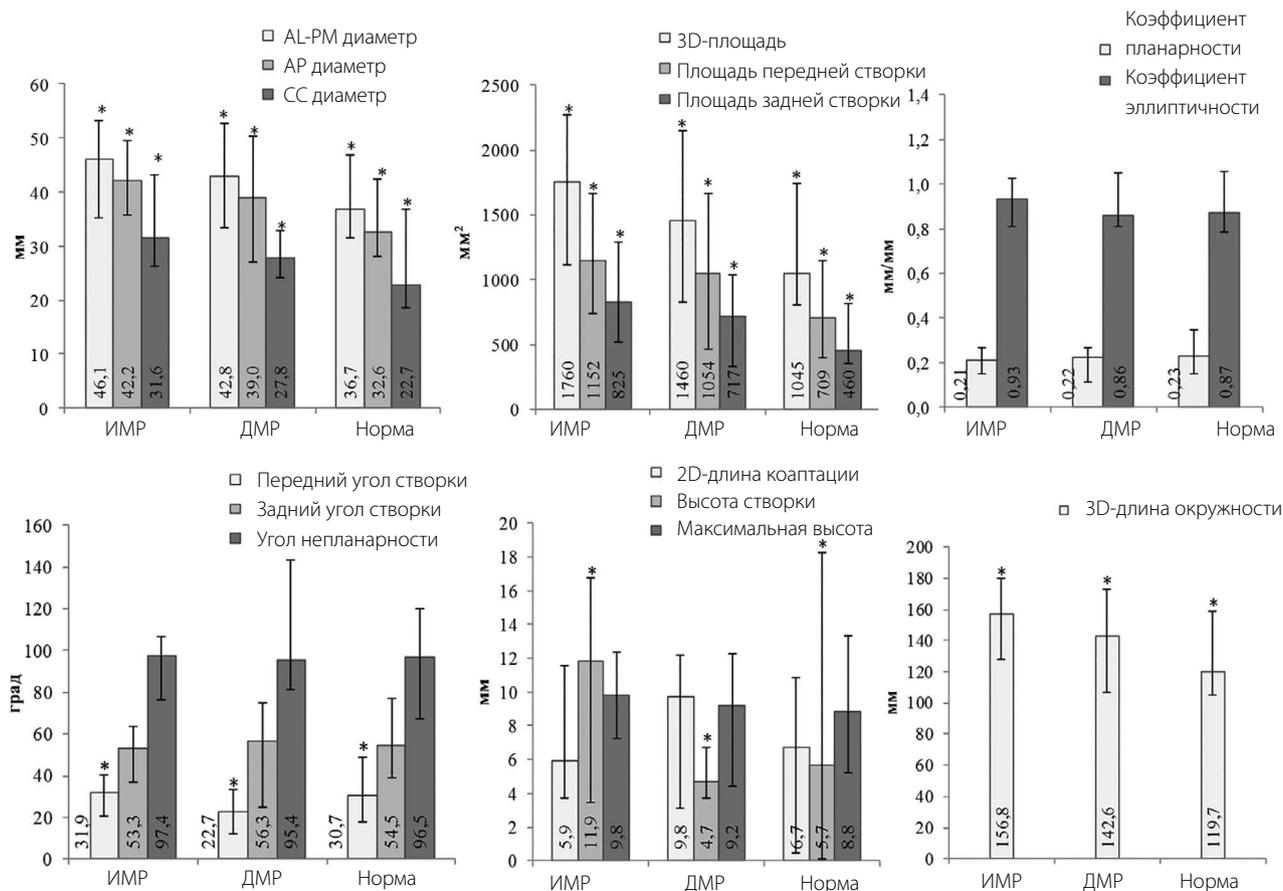
### Статистический анализ

Статистический анализ проводили в программе Statistica 10 (StatSoft, США). Учитывая непараметрическое распределение данных, подтвержденное тестом Колмогорова – Смирнова, и наличие трех независимых групп сравнения, для проверки равенства медиан нескольких выборок использовали критерий Краскела – Уоллиса. Группы попарно сравнивали с помощью U-критерия Манна – Уитни. Статистически значимыми различия считали при  $p < 0,05$ .

Табл. 1. Клинико-демографическая характеристика групп пациентов

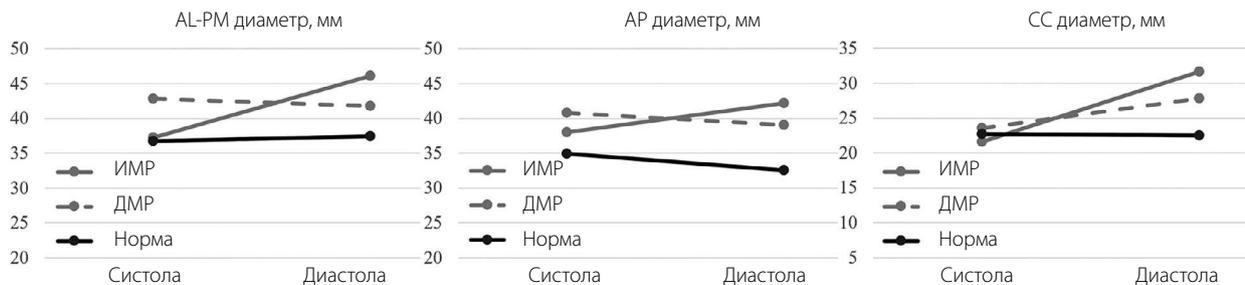
Показатель	Дегенеративная митральная регургитация	Ишемическая митральная регургитация	Норма
Количество, n	10	10	30
Возраст*, лет	(52; 70)	(40; 63)	(45; 63)
Мужской пол, n (%)	7 (70)	7 (70)	25 (83,3)
Фракция выброса**, %	70 (66; 72)	39 (27; 47)	64 (63; 66)
Конечный диастолический размер**, см	6,8 (6,3; 7,2)	7,2 (6,6; 7,5)	5,4 (5,1; 5,8)
Конечный систолический размер**, см	4,0 (3,6; 4,4)	5,8 (5,2; 6,3)	3,4 (3,2; 3,8)
Конечный диастолический объем**, мл	241 (201; 271)	273 (223; 298)	138 (126; 167)
Конечный систолический объем**, мл	72 (54; 88)	167 (131; 199)	47 (41; 62)
Степень митральной недостаточности	II–IV	II–IV	0–I

Примечание. \*Данные представлены как минимум; максимум; \*\*данные представлены как медиана (0,25; 0,75 квантили).



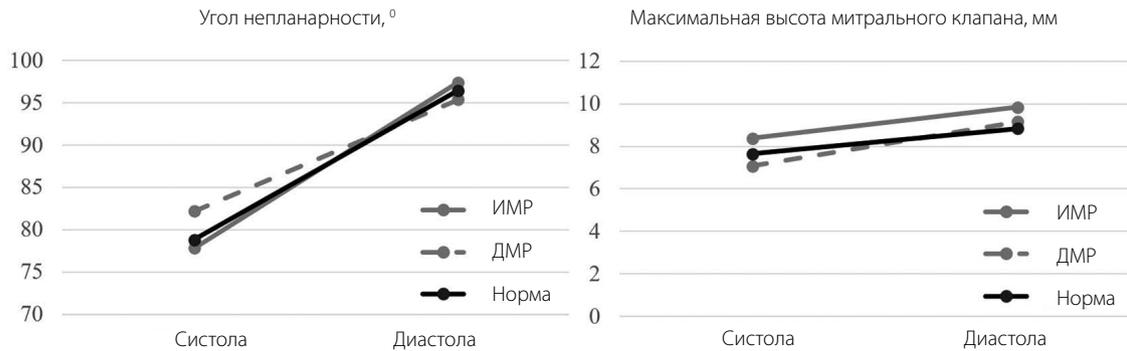
**Рис. 2.** Количественные характеристики геометрии митрального клапана при патологии и норме

*Примечание.* AL-PM диаметр — переднебоковой-заднесрединный диаметр; AP диаметр — передне-задний диаметр; СС диаметр — межкомиссуральный диаметр; ИМР — ишемическая митральная регургитация; ДМР — дегенеративная митральная регургитация; \* различия между группами достоверны (p < 0,05).



**Рис. 3.** Динамика группы параметров, характеризующих двумерное состояние фиброзного кольца митрального клапана (переднебокового-заднесрединного, передне-заднего, межкомиссурального диаметров), оцененных для обеих фаз сердечного цикла

*Примечание.* AL-PM диаметр — переднебоковой-заднесрединный диаметр; AP диаметр — передне-задний диаметр; СС диаметр — межкомиссуральный диаметр; ИМР — ишемическая митральная регургитация; ДМР — дегенеративная митральная регургитация.



**Рис. 4.** Динамика группы параметров, характеризующих трехмерную геометрию митрального клапана (угла непланарности и максимальной высоты), оцененных для обеих фаз сердечного цикла  
*Примечание.* ИМР — ишемическая митральная регургитация; ДМР — дегенеративная митральная регургитация.

## Результаты

Клинико-демографическая характеристика пациентов представлена в табл. 1.

### Измерение митрального клапана

Количественные результаты исследования геометрических параметров представлены на рис. 2. ФК МК сохраняло непланарную (трехмерную) седловидную форму при ИМР и ДМР с тенденцией к увеличению длины окружности, площадей створок и диаметров. При этом статистические

различия по исследуемым параметрам наблюдали лишь для пар «ИМР – норма» и «ДМР – норма». Различия между двумя патологиями «ИМР – ДМР» не имели статистической значимости по всем показателям.

### Динамика митрального клапана

Анализ динамических изменений геометрии ФК в цикле «систола – диастола» показал, что параметры, характеризующие двумерную геометрию (размер) кольца: переднебоковой-задне-срединный диаметр, передне-задний диаметр,

**Табл. 2.** Коэффициенты уравнения типичных моделей фиброзного кольца митрального клапана

	Дегенеративная митральная регургитация			Ишемическая митральная регургитация			Норма		
	X(t)	Y(t)	X(t)	Y(t)	Z(t)	Z(t)	X(t)	Y(t)	Z(t)
a_0	-0,29	0,04	-0,12	0,033	0,2	0,06	-0,11	0,19	-0,45
a_n+1	-5,5e-4	0,005	-4,3e-4	-4,3e-4	-5,6e-4	0,006	-0,01	0,001	0,01
a_1	-1,21	-1,84	-1,31	-1,36	-0,25	0,24	-1,73	-1,59	-0,12
a_2	0,005	0,01	-0,02	0,0036	0,17	0,15	0,02	0,03	0,17
a_3	0,03	0,11	0,06	0,0510	0,02	0,03	0,05	0,07	0,07
a_4	0,03	-0,03	0,007	-0,02	0,04	-0,06	-0,01	0,007	-0,11
a_5	-0,02	-0,03	-0,02	-0,01	0,003	0,02	-0,02	-0,02	0,02
b_1	1,57	-1,18	1,15	-1,18	0,19	0,28	1,42	1,54	-0,34
b_2	-0,001	-0,02	0,02	-0,01	0,01	0,15	-0,02	-0,002	0,06
b_3	0,03	0,03	0,02	0,01	-0,03	-0,05	0,004	-0,01	-0,04
b_4	0,04	0	0,01	-0,02	0,02	-0,03	0,01	-0,002	0,006
b_5	0,01	-0,02	0,01	-0,02	0,01	0,01	0,01	-0,01	0,005

межкомиссуральный диаметр, — изменяются не в одинаковой мере и не однонаправленно (рис. 3).

Параметры, описывающие трехмерное состояние клапана, демонстрируют однонаправленное изменение геометрии МК в ходе его работы для нормы, ИМР и ДМР, то есть схожую динамику (рис. 4).

Такие показатели, как высота створок, двумерная высота зоны коаптации, не могут быть оценены в цикле «систола – диастола» вследствие невозможности определить зону смыкания открытого клапана, поэтому исключены из анализа.

### Модель митрального клапана

Используя разработанный алгоритм анализа и усреднения геометрии ФК на массивах данных в исследуемых группах, получили уравнения, описывающие геометрию МК. Коэффициенты непараметрического уравнения для трех состояний МК приведены в табл. 2.

## Обсуждение

### Сопоставимость полученных данных

Геометрические характеристики ФК исследуемых групп согласуются с данными литературы (табл. 3).

### Непланарность митрального клапана

Важная характеристика геометрии МК — непланарность: седловидная форма кольца для аннулопластики значительно снижает напряжение в створке в сегменте P2, а также в окружном и радиальном направлениях. Данные эффекты могут снижать нагрузку на пришивные швы и потенциально увеличивать долговечность аннулопластики [19; 20]. В случае развития ИМР, и ДМР трехмерная структура МК сохраняется [18].

По данным сравнительных исследований различных типов колец для аннулопластики, далеко не все конструкции позволяют сохранить непланарность после вмешательства. Замкнутые жесткие кольца-протезы значимо уплощают форму клапана, приводя к увеличению угла непланарности. К таким изделиям относят, например, Physio (Edwards Lifesciences, США) и CG Future (Medtronic Inc., США) [18]. Разомкнутые кольца, например Cosgrove-Edwards (Edwards Lifesciences, США) и Duran (Medtronic Inc., США), напротив, сохраняют непланарность МК, в связи с чем использование плоских колец при клапаносохраняющих вмешательствах неоправданно.

### Динамика митрального клапана

Помимо трехмерной геометрии и размеров ФК важной характеристикой является сохранение

Табл. 3. Сравнение результатов исследования с данными литературы

Группа	Параметр	Данные литературы	Собственные данные
Ишемическая митральная регургитация	AL-PM диаметр, мм	43,9–44,9 [16]	46,14
	AP диаметр, мм	37,8–42,3 [16; 17]	42,17
	СС диаметр, мм	37,0–44,7 [16; 17]	31,6
	Угол непланарности, °	135,0–149,7 [16–18]	97,4
Дегенеративная митральная регургитация	AL-PM диаметр, мм	41,5–46,9 [16]	42,82
	AP диаметр, мм	38,5–41,1 [16]	39,04
	СС диаметр, мм	37,8–43,7 [16]	27,8
	Угол непланарности, °	131,00–145,43 [16–18]	95,4
Норма	AL-PM диаметр, мм	33,3 [19]	36,74
	AP диаметр, мм	28 [17; 19]	32,56
	СС диаметр, мм	33,3–36,5 [17; 19]	22,7
	Угол непланарности, °	118–130 [17–19]	96,5

Примечание. AL-PM диаметр — переднебоковой-заднесрединный диаметр; AP диаметр — передне-задний диаметр; СС диаметр — межкомиссуральный диаметр.

подвижности в цикле «систола – диастола». Анализ геометрии МК в различные фазы сердечного цикла демонстрирует статистическую значимость изменения результатов как в норме, так и при МР различной этиологии: разница показателей для систолы и диастолы может достигать 46 % (для показателя межкомиссурального диаметра в случае ИМР). Однако лишь два параметра — максимальная высота МК и угол непланарности — изменялись во всех группах однонаправленно (систола – диастола от 7,3 до 12,9 и от -16,1 до -25,2 % соответственно). При том что данные показатели характеризуют трехмерную геометрию МК, стоит предполагать, что его подвижность не снижается при развитии патологии и, более того, не изменяет направления. Показатели, характеризующие нетрехмерную динамику МК (в плоскости), напротив, изменялись разнонаправленно для ИМР и ДМР, что свидетельствует о необходимости использовать разные подходы к корректировке анатомии при данных патологиях.

Как и в случае с сохранением непланарности МК, не все кольца для аннулопластики обеспечивают необходимую подвижность ФК. Ригидные кольца-протезы ограничивают биомеханику МК и потенциально могут снижать долговечность конструкции, ускоряя выход из строя и приближая проведение повторного вмешательства. Клинические результаты частично подтверждают данный факт: в пятилетнем периоде гемодинамические характеристики были значимо лучше у пациентов с мягкими кольцами, чем с жесткими [21]. Однако после пяти лет данные различия теряют статистическую значимость. Тем не менее некоторые производители акцентируют внимание именно на сохранении подвижности ФК. Например, кольцо MEMO 3D (Sorin Group, США) со стентоподобным никелид-титановым сердечником доказанно сохраняет передне-заднюю подвижность и тем самым не ограничивает естественную механику ФК и створок в зависимости от сердечного цикла [19].

Таким образом, к восстановлению нормальной функции МК с помощью протезов-колец для аннулопластики рекомендуется подходить комплексно, корректируя не только размеры ФК, но и трехмерную геометрию, сохраняя его подвижность. Поддержание непланарной геометрии кольца и его высокая биомеханическая подвижность выглядят взаимоисключающими характеристиками и требуют более тщательного балансирования жесткости и гибкости изделия. Коммерческие протезы-кольца для аннулопластики МК могут эф-

фективно решать лишь одну из задач, что продемонстрировали M. Ryomoto и соавт. при сравнении жестких замкнутых седловидных и мягкого колец [19]. Жесткие седловидные кольца Physio II (Edwards Lifesciences, США) и Rigid Saddle Ring (St. Jude Medical, США) восстанавливали и поддерживали трехмерную геометрию МК, способствуя снижению нагрузки на створки и более физиологичному заперению. С другой стороны, их высокая жесткость не позволяла МК изменяться в ходе сердечного цикла, то есть кольца нарушали биомеханику скорректированного ФК. Мягкое кольцо MEMO 3D, напротив, сохранило подвижность МК, но не его непланарную форму [19].

Сказать однозначно, какая из характеристик ФК — непланарность или подвижность — наиболее важна, невозможно. Однако отсутствие клинически значимых различий между жесткими и мягкими кольцами в отдаленном периоде для сохранения динамики позволяет предположить, что сохранение трехмерной формы более значимо при коррекции митральной регургитации.

## Заключение

Патологические изменения ФК МК при ИМР и ДМР носят схожий характер, несмотря на этиологические различия. В то же время разнонаправленное изменение ряда показателей групп ИМР и ДМР во время цикла сердечного сокращения демонстрирует необходимость применять разные устройства для коррекции МР ишемической и дегенеративной этиологии.

## Список литературы / References

1. Delling F.N., Vasan R.S. Epidemiology and pathophysiology of mitral valve prolapse: new insights into disease progression, genetics, and molecular basis. *Circulation*. 2014;129(21):2158-2170. PMID: 24867995; PMCID: PMC4052751. <https://doi.org/10.1161/CIRCULATIONAHA.113.006702>
2. Железнев С.И., Богачев-Прокофьев А.В., Афанасьев А.В., Назаров В.М., Тулеутаев Р.М., Караськов А.М. Результаты реконструктивных операций на митральном клапане при дисплазии соединительной ткани. *Патология кровообращения и кардиохирургия*. 2015;19(2):26-35. [Zheleznev S.I., Bogachev-Prokofiyev A.V., Afanasiyev A.V., Nazarov V.M., Tuleutayev R.M., Karaskov A.M. Mitral valve reconstruction when treating connective tissue dysplasia. *Patologiya krovoobrashcheniya i kardiokhirurgiya = Circulation Pathology and Cardiac Surgery*. 2015;19(2):26-35. (In Russ.)]
3. Gammie J.S., Sheng S., Griffith B.P., Peterson E.D., Rankin J.S., O'Brien S.M., Brown J.M. Trends in mitral valve surgery in the United States: results from the Society of Thoracic Surgeons Adult Cardiac Database. *Ann Thorac Surg*. 2009;87(5):1431-

1437. PMID: 19379881. <https://doi.org/10.1016/j.athoracsur.2009.01.064>
4. David T.E., Ivanov J., Armstrong S., Rakowski H. Late outcomes of mitral valve repair for floppy valves: Implications for asymptomatic patients. *J Thorac Cardiovasc Surg.* 2003;125(5):1143-1152. PMID: 12771888. <https://doi.org/10.1067/mtc.2003.406>
  5. Шарифулин Р.М., Богачев-Прокофьев А.В., Журавлева И.Ю., Тимченко Т.П., Железнев С.И., Караськов А.М. Результаты транскатетерного протезирования митрального клапана. *Российский кардиологический журнал.* 2018;23(11):137-144. [Sharifulin R.M., Bogachev-Prokofiev A.V., Zhuravleva I.Yu., Timchenko T.P., Zheleznev S.I., Karaskov A.M. The results of transcatheter mitral valve replacement. *Russian Journal of Cardiology.* 2018;23(11):137-144. (In Russ.)] <https://doi.org/10.15829/1560-4071-2018-11-137-144>
  6. Acker M.A., Parides M.K., Perrault L.P., Moskowitz A.J., Gelijns A.C., Voisine P., Smith P.K., Hung J.W., Blackstone E.H., Puskas J.D., Argenziano M., Gammie J.S., Mack M., Ascheim D.D., Bagiella E., Moquete E.G., Ferguson T.B., Horvath K.A., Geller N.L., Miller M.A., Woo Y.J., D'Alessandro D.A., Ailawadi G., Dagenais F., Gardner T.J., O'Gara P.T., Michler R.E., Kron I.L.; Cardiothoracic Surgical Trials Network (CTSNet). Mitral-valve repair versus replacement for severe ischemic mitral regurgitation. *N Engl J Med.* 2014;370(1):23-32. PMID: 24245543; PMCID: PMC4128011. <https://doi.org/10.1056/nejmoa1312808>
  7. Mick S.L., Keshavamurthy S., Gillinov A.M. Mitral valve repair versus replacement. *Ann Cardiothorac Surg.* 2015;4(3):230-237. PMID: 26309824; PMCID: PMC4533076. <https://doi.org/10.3978/j.issn.2225-319X.2015.03.01>
  8. Tahta S.A., Oury J.H., Maxwell J.M., Hiro S.P., Duran C.M.G. Outcome after mitral valve repair for functional ischemic mitral regurgitation. *J Heart Valve Dis.* 2002;11(1):11-18. PMID: 11858163.
  9. Машина Т.В., Джанкетова В.С., Шамсиев Г.А., Голухова Е.З., Бокерия Л.А. Интраоперационная чреспищеводная трехмерная эхокардиография: клинический случай и литературная справка. *Креативная кардиология.* 2013;(1):88-93. [Mashina T.V., Dzhanketova V.S., Shamsiev G.A., Golukhova E.Z., Bockeria L.A. Intraoperative three-dimensional transesophageal echocardiography: clinical case and reference. *Creative Cardiology.* 2013;(1):88-93. (In Russ.)]
  10. McGee E.C., Gillinov A.M., Blackstone E.H., Rajeswaran J., Cohen G., Najam F., Shiota T., Sabik J.F., Lytle B.W., McCarthy P.M., Cosgrove D.M. Recurrent mitral regurgitation after annuloplasty for functional ischemic mitral regurgitation. *J Thorac Cardiovasc Surg.* 2004;128(6):916-924. PMID: 15573077. <https://doi.org/10.1016/j.jtcvs.2004.07.037>
  11. Mohty D., Orszulak T.A., Schaff H.V., Avierinos J.F., Tajik J.A., Enriquez-Sarano M. Very long-term survival and durability of mitral valve repair for mitral valve prolapse. *Circulation.* 2001;104(12 Suppl 1):I1-7. PMID: 11568020. <https://doi.org/10.1161/hc37t1.094903>
  12. Tsang W., Wu G., Rozenberg D., Mosko J., Leong-Poi H. Early mitral annuloplasty ring dehiscence with migration to the descending aorta. *J Am Coll Cardiol.* 2009;54(17):1629. PMID: 19833264. <https://doi.org/10.1016/j.jacc.2009.03.090>
  13. Bothe W., Rausch M.K., Kvitting J.P.E., Echtner D.K., Walther M., Ingels N.B. Jr, Kuhl E., Miller D.C. How do annuloplasty rings affect mitral annular strains in the normal beating ovine heart? *Circulation.* 2012;126(11 Suppl 1):S231-S238. PMID: 22965988; PMCID: PMC3465719. <https://doi.org/10.1161/CIRCULATIONAHA.111.084046>
  14. Голухова Е.З., Макаренко В.Н., Машина Т.В., Бакулева А.А. Митральная недостаточность: анализ геометрии митрального клапана (mitral valve quantification). *Креативная кардиология.* 2011;(1):129-133. [Golukhova E.Z., Makarenko V.N., Mashina T.V., Bakuleva A.A. Mitral insufficiency: analysis of the geometry of the mitral valve (mitral valve quantification). *Creative Cardiology.* 2011;(1):129-133. (In Russ.)]
  15. Долгов В.Ю., Овчаренко Е.А., Клышников К.Ю., Сизова И.Н., Кудрявцева Ю.А., Барбараш Л.С. Автоматизированный метод анализа геометрии и топологии фиброзного кольца митрального клапана. *Современные технологии в медицине.* 2016;8(2):22-30. [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 = Modern Technologies in Medicine.* 2016;8(2):22-30. (In Russ.)] <https://doi.org/10.17691/stm2016.8.2.03>
  16. Mahmood F., Gorman J.H. 3rd, Subramaniam B., Gorman R.C., Panzica P.J., Hagberg R.C., Lerner A.B., Hess P.E., Maslow A., Khabbaz K.R. Changes in mitral valve annular geometry after repair: saddle-shaped versus flat annuloplasty rings. *Ann Thorac Surg.* 2010;90(4):1212-1220. PMID: 20868816; PMCID: PMC3021250. <https://doi.org/10.1016/j.athoracsur.2010.03.119>
  17. Журавлева И.Ю., Шарифулин Р.М., Богачев-Прокофьев А.В., Нуштаев Д.В., Малахова О.Ю., Демидов Д.П., Караськов А.М. Создание трехмерной модели левых отделов сердца на основании данных эхокардиографии: инструмент для разработки транскатетерных клапанов. *Российский кардиологический журнал.* 2017;(8):75-81. [Zhuravleva I.Yu., Sharifulin R.M., Bogachev-Prokofiev A.V., Nushaev D.V., Malakhova O.Yu., Demidov D.P., Karaskov A.M. Three-dimensional model of left chambers of the heart based on echocardiography data: an instrument for development of transcatheter valves. *Russian Journal of Cardiology.* 2017;(8):75-81. (In Russ.)] <https://doi.org/10.15829/1560-4071-2017-8-75-81>
  18. Mahmood F., Subramaniam B., Gorman J.H. 3rd, Levine R.M., Gorman R.C., Maslow A., Panzica P.J., Hagberg R.M., Karthik S., Khabbaz K.R. Three-dimensional echocardiographic assessment of changes in mitral valve geometry after valve repair. *Ann Thorac Surg.* 2009;88(6):1838-1844. PMID: 19932245; PMCID: PMC3019306. <https://doi.org/10.1016/j.athoracsur.2009.07.007>
  19. Ryomoto M., Mitsuno M., Yamamura M., Tanaka H., Fukui S., Tsujiya N., Kajiyama T., Miyamoto Y. Is physiologic annular dynamics preserved after mitral valve repair with rigid or semirigid ring? *Ann Thorac Surg.* 2014;97(2):492-497. PMID: 24268749. <https://doi.org/10.1016/j.athoracsur.2013.09.077>
  20. Padala M., Hutchison R.A., Croft L.R., Jimenez J.H., Gorman R.C., Gorman J.H. 3rd, Sacks M.S., Yoganathan A.P. Saddle shape of the mitral annulus reduces systolic strains on the P2 segment of the posterior mitral leaflet. *Ann Thorac Surg.* 2009;88(5):1499-1504. PMID: 19853100; PMCID: PMC3021783. <https://doi.org/10.1016/j.athoracsur.2009.06.042>
  21. Cohn L.H., Couper G.S., Aranki S.F., Rizzo R.J., Kinchla N.M., Collins J.J. Jr. Long-term results of mitral valve reconstruction for regurgitation of the myxomatous mitral valve. *J Thorac Cardiovasc Surg.* 1994;107(1):141-150. PMID: 8283877.

## Numerical assessment of the anatomy of the annulus fibrosus of the mitral valve in health and disease as per three-dimensional echocardiography

Evgeny A. Ovcharenko, Kirill Yu. Klyshnikov, Irina N. Sizova, Natalia V. Kondyukova, Leonid S. Barbarash  
Research Institute for Complex Issues of Cardiovascular Diseases, Kemerovo, Russian Federation

**Corresponding author.** Kirill Yu. Klyshnikov, [klyshnikovk@gmail.com](mailto:klyshnikovk@gmail.com)

**Aim.** We analysed the geometry and dynamics of the annulus fibrosus of the mitral valve in normal conditions, with mitral regurgitation of degenerative and ischaemic aetiology based on three-dimensional echocardiography with subsequent mathematical processing.

**Methods.** We included the data of transesophageal three-dimensional echocardiography of 50 patients in the following three groups: 10 patients with degenerative regurgitation, 10 patients with ischaemic mitral regurgitation and 30 patients in the 'normal' group without mitral valve pathology. Transesophageal echocardiography was performed using an iE33 expert level equipment (Philips, USA), to quantitatively analyse the anterior-posterior diameter, anterolateral-posterior median diameter, intercommissural diameter, three-dimensional circumference of mitral valve, two-dimensional height of the coaptation zone, leaf height, maximum height, front and back angles of the valves, nonplanar angle, planarity coefficient and ellipticity coefficient. The measurements were performed for both the phases of the cardiac cycle, the period of expulsion of systole and the period of diastole filling, corresponding to the closed and open states of the valve. In addition, the treated data sets were processed in the QLAB programme (Philips, USA) where sets of points describing the geometry of the mitral valve were obtained. Thereafter, we used the in-house algorithm in the MATLAB R2015a environment (MathWorks, Massachusetts, USA). Mathematical models of the anatomy of the annulus rings were obtained for all the three studied groups.

**Results.** A functional study of the mitral valve showed a similar nature of changes in the geometric features of the annulus fibrosus for both the pathologies. The dynamic performance of the fibrous rings during systole-diastole cycle significantly differed among the studied groups. We present the equations for the averaged models of the annulus fibrosus of the groups analysed in the study that can be used in design, verification and computer modelling problems.

**Conclusion.** Pathological changes in the geometry of the mitral valve during ischaemic and degenerative regurgitation work on a similar principle, although there are aetiological differences. However, these pathologies differ when the changes in the geometry of the dynamics of 'systole-diastole' are analysed that warrant the use of different approaches and devices for their correction.

**Keywords:** degeneration; ischaemia; mitral valve, regurgitation; three-dimensional transesophageal echocardiography

Received 5 November 2020. Revised 12 December 2020. Accepted 22 December 2020.

**Funding:** The work is supported by a grant of the President of the Russian Federation No. 075-15-2020-067.

**Conflict of interest:** Authors declare no conflict of interest.

### Author contributions

Conception and study design: E.A. Ovcharenko, L.S. Barbarash

Data collection and analysis: K.Yu. Klyshnikov, I.N. Sizova, N.V. Kondyukova

Statistical analysis: K.Yu. Klyshnikov

Drafting the article: E.A. Ovcharenko, K.Yu. Klyshnikov

Critical revision of the article: E.A. Ovcharenko, K.Yu. Klyshnikov, I.N. Sizova, N.V. Kondyukova

Final approval of the version to be published: E.A. Ovcharenko, K.Yu. Klyshnikov, I.N. Sizova, N.V. Kondyukova, L.S. Barbarash

### ORCID ID

E.A. Ovcharenko, <https://orcid.org/0000-0001-7477-3979>

K.Yu. Klyshnikov, <https://orcid.org/0000-0003-3211-1250>

I.N. Sizova, <https://orcid.org/0000-0001-8076-8746>

N.V. Kondyukova, <https://orcid.org/0000-0002-3416-1860>

L.S. Barbarash, <https://orcid.org/0000-0002-2814-4300>

**Copyright:** © 2021 Ovcharenko et al. This is an open access article distributed under the terms of the [Creative Commons Attribution 4.0 License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

**How to cite:** Ovcharenko E.A., Klyshnikov K.Yu., Sizova I.N., Kondyukova N.V., Barbarash L.S. Numerical assessment of the anatomy of the annulus fibrosus of the mitral valve in health and disease as per three-dimensional echocardiography. *Patologiya krovoobrashcheniya i kardiokhirurgiya = Circulation Pathology and Cardiac Surgery*. 2021;25(2):50-59. (In Russ.) <http://dx.doi.org/10.21688/1681-3472-2021-2-50-59>