

# Влияние обширных дефектов перфузии на оценку показателей механической диссинхронии методом ЭКГ-синхронизированной перфузионной однофотонной эмиссионной компьютерной томографии миокарда

В.В. Шипулин<sup>1</sup>, А.А. Маслова<sup>2</sup>, С.Л. Андреев<sup>1</sup>, В.М. Шипулин<sup>1</sup>, К.В. Завадовский<sup>1</sup>

**Для корреспонденции:** Владимир Владимирович Шипулин, [shipartphoto@gmail.com](mailto:shipartphoto@gmail.com)

Поступила в редакцию 7 мая 2025 г.

Исправлена 6 октября 2025 г. Принята к печати 17 декабря 2025 г.

**Цитировать:** Шипулин В.В., Маслова А.А., Андреев С.Л., Шипулин В.М., Завадовский К.В.

Влияние обширных дефектов перфузии на оценку показателей механической диссинхронии методом ЭКГ-синхронизированной перфузионной однофотонной эмиссионной компьютерной томографии миокарда. *Патология кровообращения и кардиохирургия*. 2025;29(4):89-99. <https://doi.org/10.21688/1681-3472-2025-4-89-99>

## Информированное согласие

Получено информированное согласие пациентов на публикацию и использование медицинских данных в научных целях.

## Финансирование

Исследование не имело спонсорской поддержки.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## Вклад авторов

Концепция и дизайн работы: В.В. Шипулин, С.Л. Андреев, В.М. Шипулин, К.В. Завадовский

Сбор и анализ данных: В.В. Шипулин, А.А. Маслова, А.Л. Андреев

Статистическая обработка данных:

В.В. Шипулин, А.А. Маслова

Написание статьи: В.В. Шипулин, А.А. Маслова

Исправление статьи: В.М. Шипулин,

С.Л. Андреев, К.В. Завадовский

Утверждение окончательного варианта статьи: все авторы

## ORCID

В.В. Шипулин,

<https://orcid.org/0000-0001-9887-8214>

А.А. Маслова,

<https://orcid.org/0009-0005-3733-4455>

С.Л. Андреев,

<https://orcid.org/0000-0003-4049-8715>

В.М. Шипулин,

<https://orcid.org/0000-0003-1956-0692>

К.В. Завадовский,

<https://orcid.org/0000-0002-1513-8614>

<sup>1</sup> Научно-исследовательский институт кардиологии, филиал Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Томский национальный исследовательский медицинский центр Российской академии наук», Томск, Российская Федерация

<sup>2</sup> Федеральное государственное бюджетное учреждение «Национальный медицинский исследовательский центр имени В.А. Алмазова» Министерства здравоохранения Российской Федерации, Санкт-Петербург, Российская Федерация

## Аннотация

**Актуальность.** Оценка сократительной функции левого желудочка в последнее время становится все более распространенным «расширением» при анализе данных перфузионной сцинтиграфии и однофотонной эмиссионной компьютерной томографии, изолированной или совмещенной с рентгеновской компьютерной томографией миокарда. Она позволяет выявить дополнительные, иногда более чувствительные маркеры различных патологий, одним из которых является механическая диссинхрония. Однако при наличии больших дефектов перфузии сердечной мышцы данный подход может давать недостоверную информацию.

**Цель.** Оценить влияние обширных дефектов перфузии на определение показателей механической диссинхронии методом ЭКГ-синхронизированной перфузионной однофотонной эмиссионной компьютерной томографии миокарда.

**Методы.** В исследование были включены 65 пациентов с ишемической кардиомиопатией. Всем пациентам были проведены ЭКГ-синхронизированная перфузионная сцинтиграфия миокарда и радионуклидная томография сердца. Все исследования проводились в состоянии покоя. Пациенты были разделены на две группы по данным ЭКГ-синхронизированной перфузионной сцинтиграфии миокарда: с большими (размер дефекта перфузии относительно площади левого желудочка в состоянии функционального покоя, summed rest score  $\geq 20$  %, БДП) и меньшими (summed rest score  $< 20$  %, МДП) дефектами перфузии. С помощью радионуклидных модальностей оценивались следующие параметры сократительной функции левого желудочка: фракция выброса, %, конечный систолический, мл, и конечный диастолический, мл, объемы, а также параметры механической диссинхронии – стандартное отклонение фазовой гистограммы, град, и ширина фазовой гистограммы, град. С помощью магнитно-резонансной томографии в качестве референтного метода также оценивали фракцию выброса, конечный систолический и конечный диастолический объемы левого желудочка. За первичную конечную точку было принято summed rest score  $\geq 20$  %.

**Результаты.** Группу МДП составил 21 пациент (summed rest score 11,7 (5,8; 16,1) %), группу БДП – 44 пациента (summed rest score 30,8 (25; 41,1) %). В группе МДП различий в оцениваемых параметрах между модальностями выявлено не было, тогда как в группе БДП показатели ЭКГ-синхронизированной перфузионной сцинтиграфии миокарда значительно отличались от аналогичных по данным как радионуклидной томографии, так и магнитно-резонансной томографии. Между радионуклидной томографией и магнитно-резонансной томографией статистически значимых различий измеряемых показателей выявлено не было. Показатели механической диссинхронии в группе БДП были значительно выше по результатам ЭКГ-синхронизированной перфузионной сцинтиграфии миокарда относительно радионуклидной томографии. По данным анализа Бланда – Алтмана, все параметры не демонстрировали статистически значимых различий в группе МДП, тогда как

© Шипулин В.В., Маслова А.А.,  
Андреев С.Л., Шипулин В.М.,  
Завадовский К.В., 2025



в группе БДП объемы и механическая диссинхрония были значительно завышены, по данным ЭКГ-синхронизированной перфузионной сцинтиграфии миокарда (средние разности КДО – 52,5 мл, КСО – 35,9 мл, PSD – 7,9, HBW – 67,2), а фракция выброса занижена (–3,4 %).

**Заключение.** У пациентов с большими ( $\geq 20$  % площади миокарда левого желудочка) дефектами перфузии использование ЭКГ-синхронизированной перфузионной сцинтиграфии миокарда может привести к завышению параметров механической диссинхронии левого желудочка.

**Ключевые слова:** ишемическая кардиомиопатия; механическая диссинхрония; перфузионная однофотонная эмиссионная компьютерная томография миокарда; радионуклидная томоventрикулография

## Impact of extensive perfusion defects on the assessment of mechanical dyssynchrony indices using ECG-synchronized perfusion single-photon emission computed tomography of the myocardium

Vladimir V. Shipulin<sup>1</sup>, Anastasia A. Maslova<sup>2</sup>, Sergey L. Andreev<sup>1</sup>, Vladimir M. Shipulin<sup>1</sup>, Konstantin V. Zavadovsky

### Corresponding author:

Vladimir V. Shipulin,  
[shipartphoto@gmail.com](mailto:shipartphoto@gmail.com)

Received 7 May 2025. Revised 6 October 2025.  
Accepted 17 December 2025.

**How to cite:** Shipulin V.V., Maslova A.A., Andreev S.L., Shipulin V.M., Zavadovsky K.V. Impact of extensive perfusion defects on the assessment of mechanical dyssynchrony indices using ECG-synchronized perfusion single-photon emission computed tomography of the myocardium. *Patologiya krovoobrashcheniya i kardiokirurgiya = Circulation Pathology and Cardiac Surgery*. 2025;29(4):89-99. (In Russ.)  
<https://doi.org/10.21688/1681-3472-2025-4-89-99>

### Informed consent

The patient's informed consent to use the records for medical purposes is obtained.

### Funding

The study did not have sponsorship.

### Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

### Contribution of the authors

Conception and study design: V.V. Shipulin, S.L. Andreev, V.M. Shipulin, K.V. Zavadovsky  
Data collection and analysis: V.V. Shipulin, A.A. Maslova, S.L. Andreev  
Statistical analysis: V.V. Shipulin, A.A. Maslova  
Drafting the article: V.V. Shipulin, A.A. Maslova  
Critical revision of the article: V.M. Shipulin, S.L. Andreev, K.V. Zavadovsky  
Final approval of the version to be published: V.V. Shipulin, A.A. Maslova, S.L. Andreev, V.M. Shipulin, K.V. Zavadovsky

### ORCID

V.V. Shipulin,  
<https://orcid.org/0000-0001-9887-8214>  
A.A. Maslova,  
<https://orcid.org/0009-0005-3733-4455>  
S.L. Andreev,  
<https://orcid.org/0000-0003-4049-8715>

<sup>1</sup> Cardiology Research Institute, Tomsk National Research Medical Center, Russian Academy of Sciences, Tomsk, Russian Federation

<sup>2</sup> Almazov National Medical Research Center, St. Petersburg, Russian Federation

### Abstract

**Background:** Assessment of left ventricular (LV) contractile function along with blood supply has recently become an increasingly common “extension” in the analysis of perfusion scintigraphy and single-photon emission computed tomography data, isolated or combined with myocardial X-ray computed tomography. It enables to reveal additional, more sensitive markers of various pathologies, one of which is mechanical dyssynchrony. However, in case of large perfusion defects, this approach may provide unreliable information.

**Objective:** The study aimed at assessing the impact of extensive perfusion defects on the determination of mechanical dyssynchrony indices using ECG-synchronized perfusion single-photon emission computed tomography of myocardium.

**Methods:** Sixty-five patients with ischemic cardiomyopathy were included in the study. All patients were examined using ECG-synchronized myocardial perfusion scintigraphy and radionuclide tomoventriculography, as well as cardiac magnetic resonance imaging. All examinations were carried out in the resting state. Patients were assigned to two groups according to ECG-synchronized myocardial perfusion scintigraphy data. Some formed a group with big perfusion defect relative to the area of the LV in a state of functional rest (BDP; summed rest score  $\geq 20\%$ ), while the others entered the group with minor defect of perfusion (MDP; summed rest score  $< 20\%$ ). The following parameters of LV contractile function were assessed using radionuclide modalities: ejection fraction (%), end-systolic (ml) and end-diastolic (ml) volumes, as well as parameters of mechanical dyssynchrony (phase histogram standard deviation (deg) and phase histogram bandwidth (deg)). Magnetic resonance imaging as a reference method was used to assess ejection fraction, end-diastolic and end-systolic volumes of LV. The primary endpoint was summed rest score  $\geq 20\%$ .

**Results:** The MDP group comprised 21 patients (summed rest score 11.7 (5.8; 16.1) %) and the BDP group amounted to 44 patients (summed rest score 30.8 (25; 41.1) %). In the MDP group, no differences in the estimated parameters between modalities were found. In the BDP group the parameters obtained by the ECG-synchronized myocardial perfusion scintigraphy differed significantly from those obtained by both radionuclide tomoventriculography and magnetic resonance imaging; whereas, no significant differences in the measured parameters were found between radionuclide tomoventriculography and magnetic resonance imaging. The mechanical dyssynchrony indices in the BDP group were significantly higher according to the data of ECG-synchronized myocardial perfusion scintigraphy

V.M. Shipulin,  
<https://orcid.org/0000-0003-1956-0692>  
 K.V. Zavadovsky,  
<https://orcid.org/0000-0002-1513-8614>

© 2025 Shipulin et al.



compared to radionuclide tomoventriculography. According to Bland – Altman analysis, all parameters did not show significant differences in the MDP group. Along with that, in the BDP group, volumes and mechanical dyssynchrony were significantly overestimated according to ECG-synchronized myocardial perfusion scintigraphy data (mean differences end-diastolic volume 52.5 ml, end-systolic volume 35.9 ml, phase histogram standard deviation 7.9, phase histogram bandwidth 67.2), while ejection fraction was underestimated (–3.4 %).

**Conclusion:** In patients with large ( $\geq 20$  % of the LV myocardium area) perfusion defects, monitoring indices by the ECG-synchronized myocardial perfusion scintigraphy may lead to overestimation of LV mechanical dyssynchrony indices.

**Keywords:** blood pool SPECT; ischemic heart failure; mechanical dyssynchrony; SPECT MPI

## Введение

Оценка сократительной функции левого желудочка (ЛЖ) наряду с кровоснабжением в последнее время становится все более распространенным «расширением» при анализе данных ЭКГ-синхронизированной перфузионной однофотонной эмиссионной компьютерной томографии (ОФЭКТ) миокарда (ЭКГ-ПМС). Она позволяет выявить дополнительные, иногда более чувствительные маркеры различных патологий, а также ассоциирована с прогнозом у широкого спектра пациентов [1]. Одним из наиболее «молодых» из таких параметров является механическая диссинхрония (МД) [2]: в то время как радионуклидная вентрикулография позволяла оценивать синхронность сокращения уже достаточно давно [3], для перфузионных модальностей эта опция появилась сравнительно недавно [4]. За два прошедших десятилетия были показаны как диагностические, так и прогностические возможности МД [5–8]. Тем не менее при наличии больших дефектов перфузии данный подход может приводить к неточностям из-за сложностей корректного оконтуривания границ ЛЖ, а также значительного снижения счета импульсов в зоне рубцового поражения [9]. Однако удобство использования ЭКГ-ПМС как метода «все в одном» обуславливающее ее широкое распространение, приводит к необходимости оценки параметров сократимости, в том числе у пациентов с обширными дефектами перфузии ЛЖ.

Цель данного исследования – оценка влияния обширных дефектов перфузии на точность определения показателей механической диссинхронии методом ЭКГ-ПМС.

## Методы

### Дизайн исследования

В исследование вошли 65 пациентов с ишемической кардиомиопатией (ИКМП).

Критерии включения: фракция выброса (ФВ) ЛЖ  $< 40$  %; увеличение полостей ЛЖ; наличие в анамнезе инфаркта миокарда или реваскуляризации, и/или

стеноза  $> 75$  % ствола или проксимального стеноза передней нисходящей артерии, и/или стеноза  $> 75$  % не менее двух коронарных артерий; письменное согласие пациентов на участие в исследовании после подробного устного разъяснения.

Всем пациентам были проведены ЭКГ-ПМС в состоянии функционального покоя. В качестве референтного метода для оценки механической диссинхронии была выбрана радионуклидная томовентрикулография (ПТВГ), так как получаемые результаты соответствуют таковым при ЭКГ-ПМС и могут сравниваться напрямую. В качестве «золотого стандарта» для оценки ФВ и объемов ЛЖ использовалась магнитно-резонансная томография (МРТ). По результатам ЭКГ-ПМС пациенты были разделены на две группы: группа малых дефектов перфузии (МДП, размер дефекта перфузии относительно площади левого желудочка в состоянии функционального покоя, summed rest score, SRS  $< 20$  %) и группа больших дефектов перфузии (БДП, SRS  $\geq 20$  %) [10]. За первичную конечную точку было принято SRS  $\geq 20$  %.

### ЭКГ-синхронизированная перфузионная скintiграфия миокарда

ПТВГ- и ЭКГ-ПМС-исследования проводились с использованием гибридного специализированного ОФЭКТ/КТ-томографа Discovery NM/CT570C (GE Healthcare, США) с детекторами на основе кадмий-цинк-теллура. Томосцинтиграфия миокарда проводилась с использованием низкоэнергетического мульти-пинхол коллиматора одновременно в 19 проекциях на матрицу 32×32 пикселя (размер пикселя – 4 мм). Центр энергетического окна устанавливался на фотопик Tc99m – 140 кэВ; ширина энергетического окна была симметричной и составляла 20 %. Все записи проводились в ЭКГ-синхронизированном режиме (16 кадров на сердечный цикл; 40 % от R-R интервала – окно принятия цикла).

Внутривенное введение Tc<sup>99m</sup>-МИБИ (370 мБк) проводилось за 60 мин до выполнения исследования.

Для коррекции аттенуации всем пациентам выполняли низкодозную компьютерную томографию органов грудной клетки. Напряжение на трубке составляло 120 кВ, сила тока – 20 мА; время ротации трубки – 0,8 с; питч 0,969:1. Изображения реконструировали с толщиной среза 5 мм и межсрезовым интервалом 5 мм.

Реконструкция изображений проводилась на специализированной рабочей станции (Xeleris II; GE Healthcare, Израиль). Компьютерную обработку и оценку плотности счета импульсов производили при помощи программного обеспечения Corridor4DM (4DM, Invia Medical Imaging Solutions, США). Анализ локальных нарушений перфузии ЛЖ проводили визуально, а также с использованием стандартных индексов. Полуколичественный способ оценки производили с использованием 5-балльной шкалы, где 0 – нормальное накопление радиофармпрепарата (РФП) в миокарде (> 70 %); 1 – аккумуляция РФП 50–69 % от максимального включения в миокард; 2 – незначительно (умеренно) выраженные дефекты перфузии (30–49 % от максимального включения РФП в миокард; 3 – значительно выраженные дефекты перфузии (10–29 % от максимального включения РФП в миокард) и 4 – отсутствие или очень незначительное включение индикатора в миокард (< 10 %) [10].

Также в автоматическом режиме с применением ручной коррекции (при необходимости) высчитывали показатели ФВ, конечного диастолического объема (КДО) и конечного систолического объема (КСО) ЛЖ, а также показатели механической диссинхронии – стандартное отклонение фазовой гистограммы (phase histogram standard deviation, PSD) и ширина фазовой гистограммы (phase histogram bandwidth, HBW).

### **Радионуклидная томографиология**

Метка эритроцитов производилась *in vivo* согласно стандартному протоколу: через 15–20 мин после внутривенного введения 2 мл раствора пирофосфата (Пирфотех, «Диамед», Россия) производилось введение  $^{99m}\text{Tc}$ -пертехнетата в дозировке 9,25 МБк/кг [11].

Обработка проводилась при помощи специализированного программного обеспечения Quantitative Blood Pool SPECT 2009.0 (Cedars-Sinai, США). Было выполнено автоматическое определение поверхности эндокарда, а также были вычислены показатели, аналогичные таковым при ЭКГ-ПСМ: ФВ, КДО, КСО, PSD, HBW. Ручная коррекция контуров желудочков применялась при необходимости [12].

### **Магнитно-резонансная томография**

МРТ сердца выполнялась на томографе с напряженностью магнитного поля 1,5 Тл на аппарате Vantage Titan (Toshiba Medical Systems Corporation,

Япония). Применялся стандартный протокол: кино-MPT (ИП GRE-SSFP) в стандартных проекциях, T2-взвешенные изображения (ВИ) и T1-ВИ по короткой оси ЛЖ. Анализ проводился с помощью свободно распространяемого программного обеспечения Segment версии 2.2 R6589 (<http://segment.heiberg.se>) [13]. Полученные изображения позволяли оценить следующие параметры: размеры камер сердца и показатели глобальной сократительной функции ЛЖ (КДО ЛЖ, КСО ЛЖ, ФВ ЛЖ).

### **Этическая экспертиза**

Исследование было одобрено локальным этическим комитетом и соответствовало Хельсинкскому соглашению об исследованиях человека. Письменное информированное согласие было получено от каждого пациента после объяснения протокола, его целей и возможных рисков. Данное исследование является частью исследования SciCoRIC (ClinicalTrials.gov: NCT04508608).

### **Статистический анализ**

Все статистические расчеты производились в специализированном программном пакете MedCalc 23.0.2 (MedCalc Software Ltd Acaciaaan, Бельгия). Для проверки нормальности распределения полученных данных использовался критерий Шапиро – Уилка. Нормально распределенные количественные показатели представлены средним значением и стандартным отклонением или медианой и межквартильными интервалами при отсутствии нормального распределения. Статистическую значимость различий количественных показателей в двух независимых группах оценивали при помощи критерия Стьюдента или критерия Манна – Уитни. При попарных сравнениях из трех независимых выборок применялись поправки Бонферрони. Статистическая значимость межгрупповых различий номинальных данных оценивалась с использованием  $\chi^2$ -критерия Пирсона или точного критерия Фишера: если не менее 25 % ожидаемых значений < 5, то применялся точный критерий Фишера, в противном случае – критерий  $\chi^2$ . Для оценки статистической значимости предикторов попадания пациентов в группу БДП были построены модели однофакторной логистической регрессии. Для оценки согласованности измерений, выполненных двумя методиками, использовался метод Бланда – Алтмана. Для оценки межоператорской воспроизводимости вычислялся внутригрупповой коэффициент корреляции ICC (1,1). Критический уровень значимости при проверке статистических гипотез составлял 0,05.

## Результаты

В исследование было включено 65 пациентов с диагнозом ИКМП. Общая характеристика пациентов представлена в табл. 1.

После разделения на группы в зависимости от размера дефекта перфузии группу МДП составил 21 пациент (SRS 11,7 (5,8; 16,1) %), группу БДП – 44 пациента (SRS 30,8 (25; 41,1) %).

### Сравнение фракции выброса и объемов левого желудочка

В группе МДП статистически значимых различий в определяемых параметрах на фоне функционального покоя, полученных с помощью ЭКГ-ПССМ, РТВГ и МРТ, выявлено не было ( $p_{ФВ} = 0,46$ ;  $p_{КСО} = 0,79$ ;  $p_{КДО} = 0,09$ ). В группе БДП перфузионная методика продемонстрировала более высокие значения КДО и КСО, а также более низкие значения ФВ по сравнению с РТВГ и МРТ, в то время как последние модальности между собой не различались (рис. 1).

Согласно анализу Бланда – Альтмана (табл. 2) мы видим, что при маленьких дефектах перфузии на фоне функционального покоя все три метода не демонстрировали статистически значимых различий при анализе ФВ, КСО, КДО. Статистическую значимость различий, полученных по показателю ФВ между РТВГ и МРТ, можно объяснить феноменом «маленьких сердец», а также маленьким объемом выборки, так как есть явная тенденция к отсутствию различий. При больших дефектах перфузии КСО и КДО статистически значимо не различались только между РТВГ и МРТ ( $p_{КСО} = 0,99$ ;  $p_{КДО} = 0,8$ ). ЭКГ-ПССМ показала более высокие значения по сравнению и с МРТ (КСО: +34,8 мл;  $p = 0,008$ ; КДО: +48,7 мл;  $p = 0,0003$ ), и с РТВГ (КСО: +35,9 мл;  $p = 0,005$ ; КДО: +52,5 мл;  $p = 0,0002$ ).

### Сравнение показателей механической диссинхронии

Как видно на рис. 2, в группе МДП статистически значимых различий между показателями PSD ( $p = 0,35$ )

Табл. 1. Клиническая характеристика исследуемой группы пациентов с ИКМП

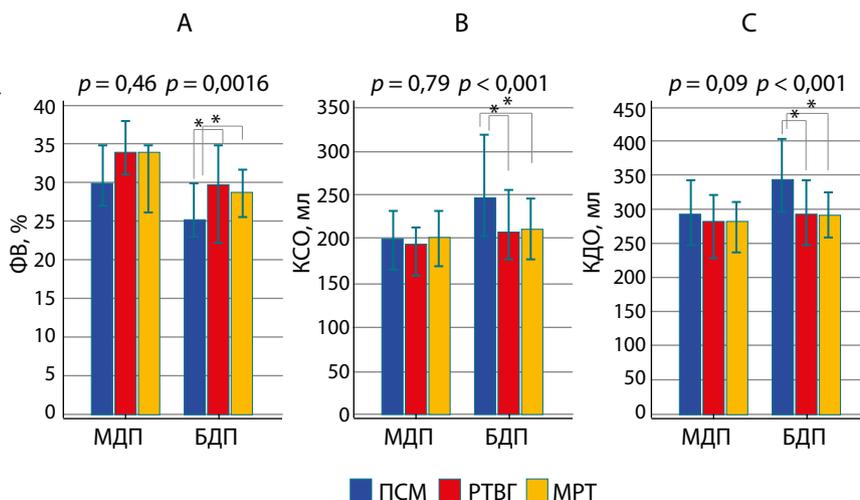
Показатель	Для всей выборки (n = 65)	Группа МДП (n = 21)	Группа БДП (n = 44)	p
Возраст, лет	60 ± 6	59 ± 6,9	60 ± 6,5	0,76
Мужчины, n (%)	60 (90)	19 (90)	38 (86)	0,16
ИМТ, кг/м <sup>2</sup>	27,1 (24,6; 30,0)	26,8 (24,6; 29,8)	29,0 (25,1; 30,1)	0,32
Дислипидемия, n (%)	49 (75)	13 (62)	32 (72)	0,75
Гипертоническая болезнь, n (%)	62 (95)	20 (95)	40 (90)	0,9
Сахарный диабет, n (%)	17 (26)	2 (10)	11 (25)	0,3
ФК СН NYHA, n (%)				
I	3 (5)	0	3 (7)	0,46
II	26 (40)	8 (38)	18 (40)	
III	34 (52)	13 (62)	21 (48)	
IV	2 (3)	0	2 (5)	
Количество коронарных артерий со стенозом > 75 %, n (%)				
1	6 (9)	1 (5)	5 (11)	0,26
2	9 (14)	6 (29)	3 (7)	
3	50 (77)	14 (66)	36 (82)	
КДО ЛЖ*, мл	297,0 (251,9; 331,5)	199 (187,3; 227,3)	215 (199,5; 234,0)	0,16
КСО ЛЖ*, мл	210,0 (179,0; 248,2)	136 (122,7; 156,0)	142,5 (131,5; 161,5)	0,15
ФВ ЛЖ*, %	29,1 (25,0; 34,8)	32,0 (26,5; 39,0)	30,0 (28,7; 34,2)	0,33
SRS, %	26,7 (23,5; 29,4)	11,7 (5,8; 16,1)	30,8 (25; 41)	<0,0001

Примечание. ИМТ – индекс массы тела; КДО ЛЖ – конечный диастолический объем левого желудочка; КСО ЛЖ – конечный систолический объем левого желудочка; ФВ ЛЖ – фракция выброса левого желудочка; ФК СН NYHA – функциональный класс сердечной недостаточности согласно классификации Нью-Йоркской кардиологической ассоциации; SRS – summed rest score, размер дефекта перфузии относительно площади левого желудочка в состоянии функционального покоя.

\* По данным 2D-эхокардиографии.

**Рис. 1.** Сравнение ЭКГ-ПСМ, РТВГ, МРТ в аспекте оценки ФВ (А), КСО (В), КДО (С) в зависимости от размера дефекта перфузии: звездочкой обозначено  $p < 0,0167$

*Примечание.* БДП – группа с дефектами перфузии  $\geq 20\%$  от площади левого желудочка; КДО – конечный диастолический объем; КСО – конечный систолический объем; МДП – группа с дефектами перфузии  $< 20\%$  от площади левого желудочка; МРТ – магнитно-резонансная томография; РТВГ – радионуклидная томографикулография; ФВ – фракция выброса; ЭКГ-ПСМ – ЭКГ-синхронизированная перфузионная однофотонная эмиссионная компьютерная томография миокарда



**Табл. 2.** Анализ Бланда – Альтмана для показателей ФВ, КСО, КДО, полученных с помощью ЭКГ-ПСМ, РТВГ, МРТ, в зависимости от размера дефекта перфузии

Показатель	Средняя разность	95 % ДИ для средней разности	p
<b>ЭКГ-ПСМ – РТВГ</b>			
МДП			
ФВ, %	-3,3	-7,26; 0,62	0,09
КСО, мл	+10,0	-12,63; 32,72	0,36
КДО, мл	+19,3	-10,60; 49,24	0,19
БДП			
ФВ, %	-3,4	-6,52; -0,22	<b>0,03</b>
КСО, мл	+35,9	10,96; 60,85	<b>0,005</b>
КДО, мл	+52,5	27,02; 77,91	<b>0,0002</b>
<b>ЭКГ-ПСМ – МРТ</b>			
МДП			
ФВ, %	-0,9	-5,00; 3,20	0,65
КСО, мл	-0,5	-28,55; 27,64	0,97
КДО, мл	+20,4	-6,76; 47,62	0,13
БДП			
ФВ, %	-2,1	-5,02; 0,79	0,15
КСО, мл	+34,8	9,44; 60,09	<b>0,008</b>
КДО, мл	+48,7	23,60; 73,83	<b>0,0003</b>
<b>РТВГ – МРТ</b>			
МДП			
ФВ, %	+2,4	0,069; 4,89	<b>0,046</b>
КСО, мл	-10,5	-29,85; 8,85	0,27
КДО, мл	+1,1	-12,57; 14,80	0,86
БДП			
ФВ, %	+1,1	-1,28; 3,43	0,36
КСО, мл	-0,1	-19,68; 19,56	0,99
КДО, мл	-2,6	-23,43; 18,19	0,8

*Примечание.* БДП – группа с дефектами перфузии  $\geq 20\%$  от площади левого желудочка; ДИ – доверительный интервал; КДО – конечный диастолический объем; КСО – конечный систолический объем; МДП – группа с дефектами перфузии  $< 20\%$  от площади левого желудочка; МРТ – магнитно-резонансная томография; РТВГ – радионуклидная томографикулография; ФВ – фракция выброса; ЭКГ-ПСМ – ЭКГ-синхронизированная перфузионная однофотонная эмиссионная компьютерная томография миокарда.

**Табл. 3.** Анализ Бланда – Альтмана для показателей МД на фоне функционального покоя, полученных с помощью ЭКГ-ПКСМ и РТВГ, в зависимости от размера дефекта перфузии

Показатель	Средняя разность	95 % ДИ для средней разности	p
<b>МДП</b>			
PSD, град	+6,0	-5,21; 17,15	0,28
НВW, град	+48,5	-3,38; 100,31	0,06
<b>БДП</b>			
PSD, град	+7,9	0,36; 15,36	<b>0,04</b>
НВW, град	+67,2	39,38; 95,08	<b>&lt;0,0001</b>

*Примечание.* БДП – группа с дефектами перфузии  $\geq 20\%$  от площади левого желудочка; ДИ – доверительный интервал; МД – механическая диссинхрония; МДП – группа с дефектами перфузии  $< 20\%$  от площади левого желудочка; РТВГ – радионуклидная томографию вентрикулография; ЭКГ-ПКСМ – ЭКГ-синхронизированная перфузионная однофотонная эмиссионная компьютерная томография миокарда; НВW – phase histogram bandwidth, ширина фазовой гистограммы; PSD – phase histogram standard deviation, стандартное отклонение фазовой гистограммы.

и НВW ( $p = 0,12$ ) на фоне функционального покоя выявлено не было, в то время как в группе БДП ЭКГ-ПКСМ превышало параметры как PSD ( $p = 0,004$ ), так и НВW ( $p = 0,0001$ ).

При сопоставлении методов по Бланду – Альтману (табл. 3) было выявлено, что в группе МДП между ЭКГ-ПКСМ и РТВГ не было статистически значимых различий в оценке показателей МД ( $p_{\text{PSD}} = 0,28$ ;  $p_{\text{НВW}} = 0,06$ ), в то время как в группе БДП ЭКГ-ПКСМ демонстрирует более высокие значения (PSD:  $+7,9^\circ$ ,  $p = 0,04$ ; НВW:  $+67,2^\circ$ ,  $p < 0,0001$ ) по сравнению с РТВГ.

При анализе моделей однофакторной логистической регрессии наблюдалась статистически значимая связь как PSD, так и НВW по данным ЭКГ-ПКСМ

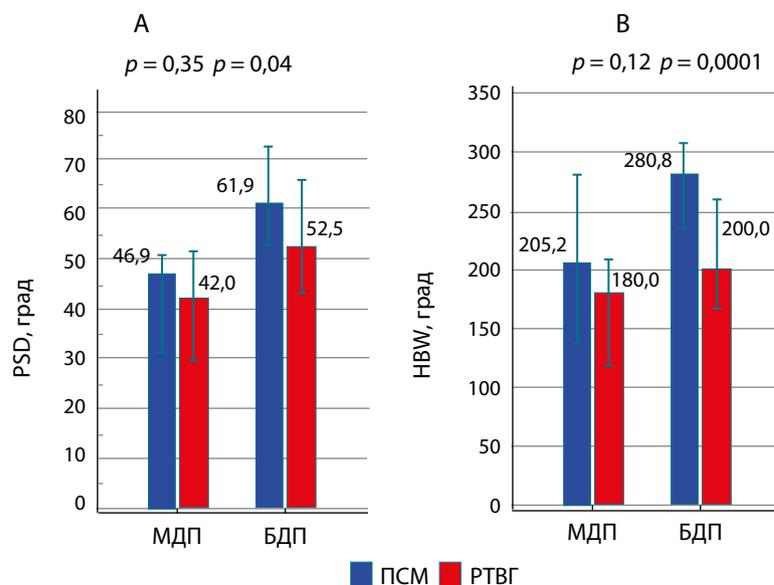
с вероятностью попадания в группу БДП (PSD: отношение шансов 1,3 (1,11; 1,51),  $p = 0,0001$ ; НВW: отношение шансов 1,04 (1,41; 1,06),  $p = 0,002$ ).

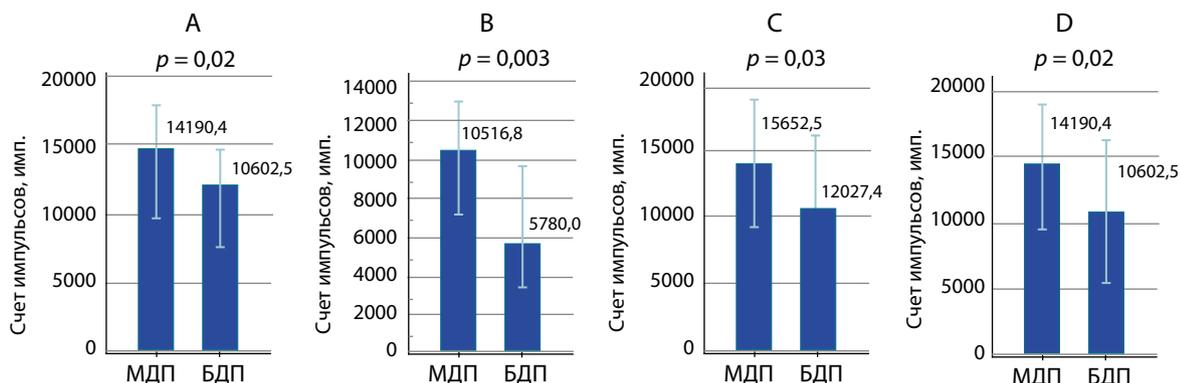
### Сравнение счета импульсов

При сравнении счета импульсов были выявлены статистически значимые различия между группами в областях с наиболее частой локализацией аневризм ЛЖ: передняя стенка, верхушка ЛЖ и межжелудочковая перегородка (рис. 3). Из этого можно сделать вывод, что завышение объемных показателей и показателей МД, которые мы наблюдали выше при сравнении ЭКГ-ПКСМ с РТВГ, связаны со снижением счета импульсов в зонах дефекта перфузии.

**Рис. 2.** Сравнение ЭКГ-ПКСМ и РТВГ в аспекте оценки PSD (А) и НВW (В) в зависимости от размера дефекта перфузии

*Примечание.* БДП – группа с дефектами перфузии  $\geq 20\%$  от площади левого желудочка; МДП – группа с дефектами перфузии  $< 20\%$  от площади левого желудочка; РТВГ – радионуклидная томографию вентрикулография; ЭКГ-ПКСМ – ЭКГ-синхронизированная перфузионная однофотонная эмиссионная компьютерная томография миокарда; НВW – phase histogram bandwidth, ширина фазовой гистограммы; PSD – phase histogram standard deviation, стандартное отклонение фазовой гистограммы





**Рис. 3.** Сравнение счета импульсов по стенкам миокарда левого желудочка в зависимости от размера дефекта перфузии: А – в общем по левому желудочку; В – верхушка левого желудочка; С – передняя стенка левого желудочка; D – межжелудочковая перегородка

*Примечание.* БДП – группа с дефектами перфузии  $\geq 20\%$  от площади левого желудочка; МДП – группа с дефектами перфузии  $< 20\%$  от площади левого желудочка.

**Табл. 4.** Межоператорская воспроизводимость показателей сократительной функции левого желудочка

Показатель	МДП						БДП					
	ИСС	95 % ДИ для ИСС	p для ИСС	Средняя разность	95 % ДИ для средней разности	p для средней разности	ИСС	95 % ДИ для ИСС	p для ИСС	Средняя разность	95 % ДИ для средней разности	p для средней разности
ЭКГ-ПСМ												
ФВ	0,995	0,988; 0,998	<0,001	-0,07	-1,23; 1,10	0,7	0,92	0,79; 0,97	0,04	2,0	-2,3; 6,3	0,07
КДО	0,99	0,97; 0,99	<0,001	3,3	-4,8; 11,5	0,41	0,87	0,79; 0,97	0,045	-12,9	-84,1; 58,1	0,04
КСО	0,99	0,98; 0,99	<0,001	2,4	-2,3; 7,1	0,57	0,94	0,91; 0,99	0,001	-11,6	-65,2; 42	0,11
PSD	0,98	0,95; 0,99	<0,001	-0,5	-5,4; 4,4	0,44	0,77	0,31; 0,92	0,51	6,6	-10,8; 23,9	0,001
НВW	0,98	0,96; 0,99	<0,001	-0,6	-19,6; 18,4	0,5	0,66	0,03; 0,89	0,67	29	-19,2; 77,1	0,003
РТВГ												
ФВ	0,98	0,86; 0,99	0,012	0,1	-2,2; 2,3	0,6	0,99	0,97; 0,99	<0,001	0,1	-2,4; 2,7	0,58
КДО	0,98	0,94; 0,99	<0,001	-4,2	-23,5; 21,1	0,08	0,99	0,97; 0,99	<0,001	-2,3	-11,1; 6,6	0,09
КСО	0,99	0,98; 0,99	<0,001	-0,4	-8,9; 8,1	0,71	0,997	0,993; 0,999	<0,001	-0,5	-7,0; 6,1	0,51
PSD	0,997	0,992; 0,999	<0,001	-0,5	-2,5; 1,4	0,58	0,999	0,998; 0,999	<0,001	0,07	-1,10; 1,23	0,31
НВW	0,997	0,985; 0,999	<0,001	-3,1	-11,3; 5,0	0,11	0,99	0,998; 0,999	<0,001	-0,8	-7,5; 5,9	0,1

*Примечание.* БДП – группа с дефектами перфузии  $\geq 20\%$  от площади левого желудочка; ДИ – доверительный интервал; КДО – конечный диастолический объем; КСО – конечный систолический объем; МДП – группа с дефектами перфузии  $< 20\%$  от площади левого желудочка; РТВГ – радионуклидная томографиюграфия; ФВ – фракция выброса; ЭКГ-ПСМ – ЭКГ-синхронизированная перфузионная однофотонная эмиссионная компьютерная томография миокарда; НВW – phase histogram bandwidth, ширина фазовой гистограммы; ИСС – внутригрупповой коэффициент корреляции; PSD – phase histogram standard deviation, стандартное отклонение фазовой гистограммы.

### Воспроизводимость

При анализе воспроизводимости было показано, что в группе с большими дефектами перфузии значительно снижается внутригрупповой коэффициент корреляции при анализе МД по данным ЭКГ-ПСМ (МДП:  $ICC_{PSD}$  0,98 (0,95; 0,99), средняя разница  $-0,5^\circ$  (-5,4; 4,4);  $ICC_{HBW}$  0,98 (0,96; 0,99), средняя разница  $-0,6^\circ$  (-19,6; 18,4); БДП:  $ICC_{PSD}$  0,77 (0,31; 0,92), средняя разница  $6,6^\circ$  (-10,8; 23,9);  $ICC_{HBW}$  0,66 (0,03; 0,89), средняя разница  $29^\circ$  (-19,2; 77,1)). Показатели ФВ, КДО и КСО также продемонстрировали ухудшение воспроизводимости по данным ЭКГ-ПСМ в группе БДП, однако менее выраженное (табл. 4). По данным РТВГ выраженных изменений в воспроизводимости между показателями выявлено не было.

### Обсуждение

ЭКГ-синхронизированная перфузионная ОФЭКТ миокарда, как и радионуклидная вентрикулография, является давно валидизированным инструментом оценки ФВ и объемов ЛЖ [14–16]. Тот факт, что при наличии больших дефектов перфузии ЭКГ-ПСМ занижает показатели ФВ по сравнению с планарной радионуклидной вентрикулографией, был показан достаточно давно [9]. Тем не менее, как это сказывается на показателях определения механической диссинхронии ЛЖ, ранее показано не было. Целью данной работы не являлась валидизация радионуклидных модальностей относительно МРТ в аспекте определения объемов и ФВ ЛЖ: МРТ выступала в качестве референта в целях демонстрации, что именно ЭКГ-ПСМ может приводить к некорректной оценке сократительной функции (в том числе механической диссинхронии) у пациентов с обширными дефектами перфузии.

Насколько нам известно, это первая работа, в которой проводится сравнение показателей механической диссинхронии между ЭКГ-синхронизированной скintiграфией и ОФЭКТ миокарда и радионуклидной томовентрикулографией на гамма-камере с детекторами на основе кадмий-цинк-теллурида в зависимости от размера дефекта перфузии. Основным результатом данного исследования: у пациентов с обширными дефектами перфузии ( $\geq 20\%$  от площади ЛЖ) ЭКГ-ПСМ миокарда завышает показатели механической диссинхронии ЛЖ.

### Сопоставление показателей механической диссинхронии

На сегодняшний день существует ограниченное количество работ, сопоставляющих показатели МД между различными модальностями. Имеются данные об умеренной корреляции этих показателей

между радионуклидными модальностями и эхокардиографией [17; 18].

Ряд исследований продемонстрировал, что МД крайне зависима от плотности счета импульсов. Так, если для влияния на ФВ и объемы ЛЖ необходимо выраженное снижение счета импульсов, то МД начинает увеличиваться уже при невыраженном падении плотности счета [19]. Важность этого феномена возрастает при снижении сократительной функции ЛЖ, так как при уменьшении разницы в счете импульсов между конечным диастолическим и конечным систолическим кадрами растет вероятность ошибки при построении гистограммы «активность – время» и, следовательно, фазовой гистограммы. В нашем исследовании в группе БДП плотность счета импульсов была значительно снижена относительно группы МДП, причем преимущественно за счет передне-перегородочной области, где наиболее часто локализуется аневризма ЛЖ у пациентов с ИКМП [20].

Полученные расхождения в параметрах МД, вероятно, связаны с особенностями программного обеспечения, которое использует разные алгоритмы построения фазовой гистограммы. Однако согласно более ранним исследованиям, хотя у здоровых добровольцев и наблюдались различия в параметрах диссинхронии при использовании четырех разных программных пакетов, с ростом асинхронности эти расхождения становились статистически незначимыми. Таким образом, выбор программного обеспечения не оказывал существенного влияния на результат при выраженных нарушениях синхронности [21].

### Воспроизводимость

Высокие показатели воспроизводимости параметров сократительной функции, оцененные при помощи радионуклидных модальностей, были ранее продемонстрированы рядом исследований [12; 22; 23]. Это обусловлено низкой зависимостью их оценки от оператора, почти полной автоматизацией, а также тем, что анализ производится на основе данных более 600 точек и 300 сердечных циклов [24].

При сравнении воспроизводимости показателей ФВ и МД у пациентов со сниженной ФВ ЛЖ de Amorim Fernandes F. и соавт. [22] показали, что, согласно анализу Бланда – Альтмана, средняя разница в определении ФВ ЛЖ составляла  $-0,39 \pm 8,4\%$ , а PSD  $5,08 \pm 8,2\%$ . Полученные данные соотносятся с полученными нами в группе с дефектами перфузии  $< 20\%$  от площади ЛЖ. В указанном исследовании ишемический генез сердечной недостаточности был только у 31% пациен-

тов, а данные о выраженности нарушения перфузии отсутствовали.

Legallois D. и соавт. [23] в рамках мультицентрового исследования продемонстрировали хорошую воспроизводимость показателей ФВ ЛЖ (Lin's CCC 0,87 (0,79; 0,92), разница между операторами по Бланду – Альтману 0,98 (–8,31; 10,78)) и умеренную воспроизводимость показателей диссинхронии (PSD Lin's CCC 0,75 (0,61; 0,84), разница по Бланду – Альтману –0,83 (–16,85; –15,19); HBW Lin's CCC 0,68 (0,51; 0,79), разница по Бланду – Альтману –3,47 (–69,75; 62,8)) у пациентов со сниженной ФВ ЛЖ. Размер дефекта перфузии (SRS) при этом равнялся  $24 \pm 10$  %. Показатели воспроизводимости, полученные в данном исследовании, аналогичны полученным нами в группе с большими дефектами перфузии. Однако авторы не сравнивают полученные результаты с таковыми у пациентов с менее выраженными нарушениями кровоснабжения ЛЖ.

Trimble M.A. и соавт. [25] сравнивали показатели МД между группами с ИКМП и контроля по данным ЭКГ-ПССМ: воспроизводимость в группе с ИКМП была ниже по показателю HBW (ICC 0,84 и 0,73 соответственно), однако показатель PSD продемонстрировал обратную тенденцию (ICC 0,85 и 0,93 соответственно). В данном исследовании не приводятся данные о выраженности нарушения кровоснабжения ЛЖ: пациенты с ИКМП в зависимости от типа ремоделирования ЛЖ могут иметь небольшие дефекты перфузии, что могло привести к таким результатам в воспроизводимости PSD.

### Практическое применение

При необходимости оценки механической диссинхронии у описанной группы пациентов рекомендовано использование РТВГ либо в случае необходимости оценки одномоментно сократимости и перфузии рекомендуется увеличивать время записи ЭКГ-ПССМ.

### Ограничения исследования

В данном исследовании отсутствует третий референсный метод для оценки механической диссинхронии. Это обусловлено тем, что напрямую сравнить показатели, получаемые радионуклидными модальностями, можно только между собой. Группу МДП составил 21 пациент.

### Заключение

На основании полученных результатов можно говорить о том, что при наличии обширных дефектов перфузии ЭКГ-ПССМ и РТВГ не являются взаимозаменяемыми методами для исследования показателей сократительной функции, в особенности механической диссинхронии ЛЖ. Радионуклидная томовентрикулография основана на визуализации пула крови, в отличие от ЭКГ-ПССМ, где визуализируется стенка миокарда. Таким образом, перфузионная модальность может приводить к некорректной оценке показателей из-за ошибок обводки контура ЛЖ, а также зависимости некоторых показателей (в особенности механической диссинхронии) от счета импульсов, сниженных в области дефекта перфузии.

## Список литературы / References

1. Шипулин В.В., Саушкин В.В., Пряхин А.С., Андреев С.Л., Веснина Ж.В., Завадовский К.В. Возможности перфузионной сцинтиграфии миокарда в обследовании пациентов с ишемической кардиомиопатией. *Российский электронный журнал лучевой диагностики*. 2019;9(3):155-175. <https://doi.org/10.21569/2222-7415-2019-9-3-155-175>  
Shipulin V.V., Saushkin V.V., Pryakhin A.S., Andreev S.L., Vesnina Zh.V., Zavadovsky K.V. The value of myocardium perfusion imaging in assessment of patients with ischemic cardiomyopathy. *REJR*. 2019;9(3):155-175. (In Russ.) <https://doi.org/10.21569/2222-7415-2019-9-3-155-175>
2. Саушкин В.В., Мишкина А.И., Шипулин В.В., Завадовский К.В. Значение радионуклидной оценки механической диссинхронии сердца в обследовании пациентов кардиологического профиля. *Российский электронный журнал лучевой диагностики*. 2019;9(1):186-202. <https://doi.org/10.21569/2222-7415-2019-9-1-186-202>  
Saushkin V.V., Mishkina A.I., Shipulin V.V., Zavadovsky K.V. The value of radionuclide assessment of mechanical dyssynchrony in patients with cardiac diseases. *REJR*. 2019;9(1):186-202. (In Russ.) <https://doi.org/10.21569/2222-7415-2019-9-1-186-202>
3. Links J.M., Douglass K.H., Wagner H.N. Jr. Patterns of ventricular emptying by Fourier analysis of gated blood-pool studies. *J Nucl Med*. 1980;21(10):978-82. PMID: 7420197.
4. Chen J., Garcia E.V., Folks R.D., Cooke C.D., Faber T.L., Tauxe E.L., Iskandrian A.E. Onset of left ventricular mechanical contraction as determined by phase analysis of ECG-gated myocardial perfusion SPECT imaging: development of a diagnostic tool for assessment of cardiac mechanical dyssynchrony. *J Nucl Cardiol*. 2005;12(6):687-95. PMID: 16344231. <https://doi.org/10.1016/j.nuclcard.2005.06.088>
5. Allen LaPointe N.M., Ali-Ahmed F., Dalgaard F., Kosinski A.S., Sanders Schmidler G., Al-Khatib S.M. Cardiac resynchronization therapy outcomes with left ventricular lead concordant with latest mechanical activation: A meta-analysis. *Pacing Clin Electrophysiol*. 2022;45(8):930-939. PMID: 35687711; PMCID: PMC10752256. <https://doi.org/10.1111/pace.14549>
6. Lee K., Han S., Ryu J., Cho S.G., Moon D.H. Prognostic value of left ventricular mechanical dyssynchrony indices derived from gated myocardial perfusion SPECT in coronary artery disease: a systematic review and meta-analysis. *Ann Nucl Med*. 2024;38(6):441-449. PMID: 38498236. <https://doi.org/10.1007/s12149-024-01915-7>

7. Kuronuma K., Miller R.J.H., Otaki Y., Van Kriekinge S.D., Diniz M.A., Sharir T., Hu L.H., Gransar H., Liang J.X., Parekh T., Kavanagh P.B., Einstein A.J., Fish M.B., Ruddy T.D., Kaufmann P.A., Sinusas A.J., Miller E.J., Bateman T.M., Dorbala S., Di Carli M., Tamarappoo B.K., Dey D., Berman D.S., Slomka P.J. Prognostic Value of Phase Analysis for Predicting Adverse Cardiac Events Beyond Conventional Single-Photon Emission Computed Tomography Variables: Results From the REFINE SPECT Registry. *Circ Cardiovasc Imaging*. 2021;14(7):e012386. PMID: 34281372; PMCID: PMC8978932. <https://doi.org/10.1161/CIRCIMAGING.120.012386>
8. Shipulin V.V., Andreev S., Kopeva K., Shipulin V.M., Zavadovsky K. The Value of Stress-Gated Blood Pool SPECT in Predicting Early Postoperative Period Complications in Ischemic Cardiomyopathy Patients: Focus on Mechanical Dyssynchrony. *J Clin Med*. 2023;12(16):5328. PMID: 37629370; PMCID: PMC10455889. <https://doi.org/10.3390/jcm12165328>
9. Manrique A., Faraggi M., Véra P., Vilain D., Lebtahi R., Cribier A., Le Guludec D. 201TI and 99mTc-MIBI gated SPECT in patients with large perfusion defects and left ventricular dysfunction: comparison with equilibrium radionuclide angiography. *J Nucl Med*. 1999;40(5):805-9. PMID: 10319754.
10. Dorbala S., Ananthasubramaniam K., Armstrong I.S., Chareonthaitawee P., DePuey E.G., Einstein A.J., Gropler R.J., Holly T.A., Mahmarian J.J., Park M.A., Polk D.M., Russell R. 3rd, Slomka P.J., Thompson R.C., Wells R.G. Single Photon Emission Computed Tomography (SPECT) Myocardial Perfusion Imaging Guidelines: Instrumentation, Acquisition, Processing, and Interpretation. *J Nucl Cardiol*. 2018;25(5):1784-1846. PMID: 29802599. <https://doi.org/10.1007/s12350-018-1283-y>
11. Farrell M.B., Galt J.R., Georgoulis P., Malhotra S., Pagnanelli R., Rischpler C., Savir-Baruch B. SNMMI Procedure Standard/EANM Guideline for Gated Equilibrium Radionuclide Angiography. *J Nucl Med Technol*. 2020;48(2):126-135. PMID: 32499322. <https://doi.org/10.2967/jnm.120.246405>
12. Shipulin V.V., Andreev S.L., Pryakhin A.S., Mochula A.V., Maltseva A.N., Sazonova S.I., Shipulin V.M., Massalha S., Zavadovsky K.V. Low-dose dobutamine stress gated blood pool SPECT assessment of left ventricular contractile reserve in ischemic cardiomyopathy: a feasibility study. *Eur J Nucl Med Mol Imaging*. 2022;49(7):2219-2231. PMID: 35150293. <https://doi.org/10.1007/s00259-022-05714-y>
13. Heiberg E., Sjögren J., Ugander M., Carlsson M., Engblom H., Arheden H. Design and validation of Segment – freely available software for cardiovascular image analysis. *BMC Med Imaging*. 2010;10:1. PMID: 20064248; PMCID: PMC2822815. <https://doi.org/10.1186/1471-2342-10-1>
14. Cochet H., Bullier E., Gerbaud E., Durieux M., Godbert Y., Lederlin M., Coste P., Barat J.L., Laurent F., Montaudon M. Absolute quantification of left ventricular global and regional function at nuclear MPI using ultrafast CZT SPECT: initial validation versus cardiac MR. *J Nucl Med*. 2013;54(4):556-63. PMID: 23385955. <https://doi.org/10.2967/jnumed.112.110577>
15. Schaefer W.M., Lipke C.S., Standke D., Kühl H.P., Nowak B., Kaiser H.J., Koch K.C., Buell U. Quantification of left ventricular volumes and ejection fraction from gated 99mTc-MIBI SPECT: MRI validation and comparison of the Emory Cardiac Tool Box with QGS and 4D-MSPECT. *J Nucl Med*. 2005;46(8):1256-63. PMID: 16085580.
16. Apert A., Canu M., Jankowski A., Riou L., Broisat A., Charlon C., Augier C., Boignard A., Leenhardt J., Salvat M., Casset C., Maurin M., Saunier C., Vanzetto G., Fagret D., Ghezzi C., Djaleb L., Barone-Rochette G. Comparison of Cadmium Zinc Telluride ECG-gated SPECT equilibrium radionuclide angiography to magnetic resonance imaging to measure right ventricular volumes and ejection fraction in patients with cardiomyopathy. *J Nucl Cardiol*. 2022;29(4):1647-1656. PMID: 33988809. <https://doi.org/10.1007/s12350-021-02653-3>
17. Singhal A., Khangembam B.C., Seth S., Patel C. Equilibrium Radionuclide Angiography in Evaluation of Left Ventricular Mechanical Dyssynchrony in Patients with Dilated Cardiomyopathy: Comparison with Electrocardiographic Parameters and Speckle-Tracking Echocardiography. *Indian J Nucl Med*. 2019;34(2):88-95. PMID: 31040518; PMCID: PMC6481198. [https://doi.org/10.4103/ijnm.IJNM\\_165\\_18](https://doi.org/10.4103/ijnm.IJNM_165_18)
18. Chen Y., Xue X., Gu Y., Xu H., Zhang X. Equilibrium radionuclide angiography compared with tissue doppler imaging for detection of right ventricular dyssynchrony and prediction of acute response to cardiac resynchronization therapy. *Medicine (Baltimore)*. 2020;99(9):e19296. PMID: 32118744; PMCID: PMC7478515. <https://doi.org/10.1097/MD.00000000000019296>
19. Kita A., Onoguchi M., Shibutani T., Sugimoto K., Kosaka N., Adachi T., Kimura H. Influence of myocardial count on phase dyssynchrony analysis of gated myocardial perfusion single-photon emission computed tomography. *Nucl Med Commun*. 2019;40(2):124-130. PMID: 30461698. <https://doi.org/10.1097/MNM.0000000000000949>
20. Шипулин В.М., Пряхин А.С., Андреев С.Л., Шипулин В.В., Чумакова С.П., Рябова Т.Р., Стельмашенко А.И., Беляева С.А., Лелик Е.В. Современные клинико-фундаментальные аспекты в диагностике и лечении пациентов с ишемической кардиомиопатией (обзор). *Сибирский журнал клинической и экспериментальной медицины*. 2021;36(1):20-29. <https://doi.org/10.29001/2073-8552-2021-36-1-20-29>  
Shipulin V.M., Pryakhin A.S., Andreev S.L., Shipulin V.V., Chumakova S.P., Ryabova T.R., Stelmashenko A.I., Belyaeva S.A., Lelik E.V. Modern clinical and fundamental aspects in the diagnosis and treatment of patients with ischemic cardiomyopathy (Review). *The Siberian Journal of Clinical and Experimental Medicine*. 2021;36(1):20-29. (In Russ.) <https://doi.org/10.29001/2073-8552-2021-36-1-20-29>
21. Okuda K., Nakajima K., Matsuo S., Kashiwaya S., Yoneyama H., Shibutani T., Onoguchi M., Hashimoto M., Kinuya S. Comparison of diagnostic performance of four software packages for phase dyssynchrony analysis in gated myocardial perfusion SPECT. *EJNMMI Res*. 2017;7(1):27. PMID: 28337725; PMCID: PMC5364119. <https://doi.org/10.1186/s13550-017-0274-3>
22. de Amorim Fernandes F., Peix A., Giubbini R., Karthikeyan G., Massardo T., Patel C., Pabon L.M., Jimenez-Heffernan A., Alexanderson E., Butt S., Kumar A., Marin V., Morozova O., Paez D., Mesquita C.T., Garcia E.V. Reproducibility of global LV function and dyssynchrony parameters derived from phase analysis of gated myocardial perfusion SPECT: A multicenter comparison with core laboratory setting. *J Nucl Cardiol*. 2022;29(3):952-961. PMID: 33083983. <https://doi.org/10.1007/s12350-020-02397-6>
23. Legallois D., Marie P.Y., Franken P.R., Djaballah W., Agostini D., Manrique A. Comparison of the dyssynchrony parameters recorded with gated SPECT in ischemic cardiomyopathy according to their repeatability at rest and to their ability to detect a synchrony reserve under dobutamine infusion. *J Nucl Cardiol*. 2020;27(6):2247-2257. PMID: 30515748. <https://doi.org/10.1007/s12350-018-01546-2>
24. Salimian S., Thibault B., Finnerty V., Grégoire J., Harel F. Phase analysis of gated blood pool SPECT for multiple stress testing assessments of ventricular mechanical dyssynchrony in a tachycardia-induced dilated cardiomyopathy canine model. *J Nucl Cardiol*. 2017;24(1):145-157. PMID: 26686363. <https://doi.org/10.1007/s12350-015-0338-6>
25. Trimble M.A., Velazquez E.J., Adams G.L., Honeycutt E.F., Pagnanelli R.A., Barnhart H.X., Chen J., Iskandrian A.E., Garcia E.V., Borges-Neto S. Repeatability and reproducibility of phase analysis of gated single-photon emission computed tomography myocardial perfusion imaging used to quantify cardiac dyssynchrony. *Nucl Med Commun*. 2008;29(4):374-81. PMID: 18317303; PMCID: PMC3048057. <https://doi.org/10.1097/MNM.0b013e3282f81380>