

<https://doi.org/10.35336/VA-2021-1-14-22>

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОТОКОЛА МУЛЬТИСПИРАЛЬНОЙ КОМПЬЮТЕРНОЙ ТОМОГРАФИИ  
СЕРДЦА ДЛЯ ПЛАНИРОВАНИЯ ИНТЕРВЕНЦИОННОГО ЛЕЧЕНИЯ АРИТМИЙ  
Н.Ю.Каштанова<sup>1</sup>, Е.В.Кондратьев<sup>1</sup>, Г.Г.Кармазановский<sup>1,2</sup>, И.С.Груздев<sup>1</sup>, Е.А.Артюхина<sup>1</sup>,  
М.В.Яшков<sup>1</sup>, А.Ш.Ревивили<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФГБУ «НМИЦ хирургии им. А.В.Вишневого» Министерства здравоохранения Российской Федерации, Москва; <sup>2</sup>ФГБОУ ВО Российский национальный исследовательский медицинский университет им. Н.И.Пирогова Министерства здравоохранения Российской Федерации, Москва

**Цель исследования.** Сравнение протоколов контрастного усиления при компьютерной томографии (КТ) для определения оптимальной методики контрастирования полостей сердца и оценка ее влияния на результаты неинвазивного поверхностного картирования.

**Материалы и методы.** В исследование включены 93 пациента с аритмиями, которым планировалась катетерная абляция источников аритмии. Для топической диагностики на дооперационном этапе выполняли неинвазивное поверхностное картирование, включающее многоканальную регистрацию электрокардиограммы (ЭКГ) и КТ камер сердца с внутривенным контрастным усилением (КУ). Использовали 3 варианта КУ: 1 группа - монофазное (50 пациентов); 2 группа - сплит-болюс (18 пациентов), 3 группа - с введением предварительного болюса (25 пациентов). Оценку контрастирования проводили качественно и количественно (измерение плотности содержимого камер, расчет вентрикуло-миокардиального отношения контрастирования VM-LV и VM-RV для левого и правого желудочков, соответственно). Совмещение ЭКГ и КТ данных проводилось полуавтоматически на диагностическом комплексе «Амикард 01К».

**Результаты.** Вне зависимости от методики КУ отмечалось достаточное и гомогенное контрастирование только левого предсердия (ЛП) и левого желудочка (ЛЖ) (средняя плотность крови в ЛП более 278 HU, ЛЖ более 250 HU, VM-LV более 0,582). При использовании монофазного протокола контрастирование правых отделов было недостаточным, в большинстве случаев средняя плотность контрастированной крови в просвете правых отделов была ниже 200 HU, VM-RV 0,256. Контрастное усиление по методике сплит-болюс за счет удлинения времени введения позволило улучшить визуализацию правых отделов (плотность в правом предсердии (ПП) 258 HU, ПЖ 227 HU, VM-RV 0,541), однако сохранялась гетерогенность полости ПП за счет артефактов от верхней полой вены (ПВ) и притока неконтрастированной крови из нижней ПВ. Введение предварительного болюса привело к улучшению контрастности между миокардом ПП и кровью за счет рециркуляции контрастированной крови и поступления ее в нижней ПВ (плотность 294 HU). Качество контрастирования правого желудочка было сходным с показателями 2 группы (плотность 264 HU, VM-RV 0,565).

**Закключение.** Использование технологии контрастирования сплит-болюс и технологии с введением предварительного болюса улучшает визуализацию правых отделов сердца, поддерживая высокий уровень контрастирования левых отделов. При необходимости точной дифференцировки внутренних контуров правого предсердия предпочтительно использование предварительного болюса.

**Ключевые слова:** компьютерная томография; радиочастотная абляция; неинвазивное картирование сердца; аритмия

**Конфликт интересов:** авторы заявили об отсутствии потенциального конфликта интересов

**Рукопись получена:** 25.11.2020 **Исправленная версия получена:** 09.02.2021 **Принята к публикации:** 15.02.2021

**Ответственный автор:** Каштанова Наталья Юрьевна, E-mail: nat.y.kashtanova@mail.ru

**Для цитирования:** Каштанова НЮ, Кондратьев ЕВ, Кармазановский ГГ, Груздев ИС, Артюхина ЕА, Яшков МВ, Ревивили АШ. Совершенствование протокола мультиспиральной компьютерной томографии сердца для планирования интервенционного лечения аритмий. *Вестник аритмологии*. 2021;28(1): 14-22. <https://doi.org/10.35336/VA-2021-1-14-22>.

THE IMPROVEMENT OF CARDIAC MULTISPIRAL COMPUTED TOMOGRAPHY PROTOCOL  
FOR PLANNING INTERVENTIONAL ARRHYTHMIA MANAGEMENT

N.Yu.Kashtanova<sup>1</sup>, E.V.Kondratyev<sup>1</sup>, G.G.Karmazanovsky<sup>1,2</sup>, I.S.Gruzdev<sup>1</sup>, E.A.Artyukhina<sup>1</sup>,  
M.V.Yashkov<sup>1</sup>, A.Sh.Revishvili<sup>1</sup>

<sup>1</sup>A.V. Vishnevsky National Medical Research Center of Surgery of the Ministry of Health of the Russian Federation, Moscow; <sup>2</sup>Russian National Research Medical University named after N.I. Pirogov of the Ministry of Health of the Russian Federation, Moscow

**Purpose.** Comparison of computer tomography (CT) contrast enhancement (CE) protocols for optimal visualization of cardiac chamber, definition it's influence on results of non-invasive superficial cardiac mapping.

**Materials and methods.** The study included 93 patients with heart rhythm disorders who planned catheter ablation of arrhythmia. Noninvasive cardiac mapping was made for topical diagnostics. It includes multichannel ECG-registration and CT with intravenous CE (1st group - monophasic (50 patients), 2nd group - split-bolus (18 patients), 3rd group - with pre-bolus (25 patients). Qualitative and quantitative (measurement of mean blood attenuation in four chambers, calculation of ventricular-myocardial contrast-to-noise ratio VM-LV и VM-RV for left ventricle (LV) and right ventricle (RV), respectively) parameters were compared between groups. Fusion of ECG and CT data was made semi-automatic with diagnostic complex «Amycard 01K».

**Results.** Regardless of CE technique was noted sufficient and homogeneous contrast attenuation of left atrium (LA) and LV (mean blood attenuation in LA more than 278 HU, LV 250 HU, VM-LV 0,582). Enhancement of right heart was insufficient with monophasic protocol, in most cases the average CT density was lower than 200 HU, VM-RV 0,256. Split-bolus protocol improves visualization of right atrium (RA) and RV (blood density in RA 258HU, RV 227HU, VM-RV 0,541), however there was heterogeneity of RA cavity because of artifacts from superior vena cava (VC) and unenhanced blood from inferior inferior VC. Using of pre-bolus increases contrast ratio between RA myocardium and blood due to increasing CT density of blood in inferior VC (blood density 294 HU). Quality of right ventricle CE was similar to 2nd group (blood density 264 HU, VM-RV 0,565).

**Conclusion.** CE protocols split-bolus and with pre-bolus improve visualization of right ventricle, supporting the high level enhancement of left heart. Protocol with pre-bolus is preferable for exact differentiation of right atrial endocardial contour.

**Keywords:** computed tomography; radiofrequency ablation; noninvasive cardiac mapping; arrhythmia

**Conflict of Interests:** nothing to declare

**Received:** 25.11.2020 **Revision received:** 09.02.2021 **Accepted:** 15.02.2021

**Corresponding author:** Kashtanova Natalya, E-mail: nat.y.kashtanova@mail.ru

**For citation:** Kashtanova NYu, Kondratyev EV, Karmazanovsky GG, Gruzdev IS, Artyukhina EA, Yashkov MV, Revishvili ASH. The improvement of cardiac multispiral computed tomography protocol for planning interventional arrhythmia management. *Journal of Arrhythmology*. 2021;28(1): 14-22. <https://doi.org/10.35336/VA-2021-1-14-22>.

В последние годы активно развиваются катетерные методики лечения нарушений ритма сердца, в частности радиочастотная и криоабляция. Процедура абляции выполняется под контролем рентгеноскопии, внутрисердечной эхокардиографии или трехмерного электроанатомического картирования [1]. С 2000-х годов помимо стандартного интраоперационного картирования появились системы многоканального неинвазивного картирования сердца [2-4]. Основными преимуществами являются неинвазивный характер, возможность одновременного картирования всех четырех камер сердца, возможность не только эндокардиального, но и эпикардиального картирования [5]. Данные, полученные при поверхностном неинвазивном картировании сердца, позволяют быстрее и более точно визуализировать область аритмогенного субстрата, выбрать оптимальную технологию для проведения катетерной абляции, сократить время оперативного вмешательства [6, 7].

В мировых научных источниках представлены подробные данные о методиках поверхностного картирования, сравнении точности с инвазивным электрофизиологическим и электроанатомическим картированием, влиянии дооперационных данных на процедуру абляции. Важным фактором получения высокой достоверности анатомических данных при поверхностном картировании является получение высокого качества компьютерных томограмм (КТ), которое зависит не только от возможностей аппарата компьютерной томографии и настроек сканирования, но и от выбора методики контрастного усиления (КУ), позволяющей одномоментное получение высокой

контрастности между миокардом и кровью в полостях предсердий или желудочков. В мировой литературе представлено множество исследований о поиске наиболее оптимальной методики КУ для КТ-коронароангиографии, КТ левого предсердия (ЛП) и легочных вен, в меньшей степени отражена визуализация правого предсердия (ПП) и правого желудочка (ПЖ). Однако нами не было встречено научных данных о влиянии качества получаемых при компьютерной томографии сердца изображений на результаты неинвазивного картирования.

Цель исследования: сравнение протоколов контрастного усиления при КТ для определения оптимальной методики контрастирования полостей сердца, и оценка ее влияния на качество трехмерных реконструкций, построенных при неинвазивном поверхностном картировании сердца.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В ФГБУ «НМИЦ хирургии им. А.В. Вишневского» с апреля 2018 г. по март 2020 г. были госпитализированы 93 пациента с различными формами нарушений ритма сердца для выполнения катетерной абляции источников аритмии. У большинства пациентов регистрировали предсердные нарушения ритма - 73 пациента (78,5%), желудочковые аритмии - 20 пациентов (21,5%). Среди пациентов преобладали мужчины: 57 пациентов (61%), средний возраст 56±12,3 лет. На дооперационном этапе всем пациентам выполняли КТ камер сердца с КУ и трехмерное моделирование камер сердца с помощью стандартного программного обеспе-

чения КТ - Philips Intellispace Portal. Пациенты были разделены на 3 группы в зависимости от используемой методики КУ. Распределение демографических показателей внутри групп было сходным (табл. 1).

Всем пациентам выполняли нативное низкодозовое КТ-исследование органов грудной клетки с захватом всех электродов поверхностного картирования и исследование области сердца с внутривенным контрастным усилением и ЭКГ-синхронизацией (выполняли артериальную фазу сканирования для получения анатомических данных и отсроченную фазу сканирования для исключения внутрисердечного тромбоза). Сканирование выполнялось на томографах Philips Brilliance 64 и Philips Ingenuity 64. Использовали 3 методики контрастного усиления: стандартную монофазную, «сплит-болюс» и методику с введением «предварительного болюса».

Методика введения контрастного средства (КС) в 1 группе: монофазное введение КС из расчета 1 мл на 1 кг веса, далее 40 мл физиологического раствора (ФР) - 50 пациентов. Методика введения КС во 2 группе: дробное введение по методике «сплит-болюс». 1 фаза - 2/3 объема неразведенного КС, 2 фаза - 1/3 объема КС в разведении с ФР в пропорции 1:1, 3 фаза - 40 мл ФР (18 пациентов). Методика введения КС в 3 группе: 0 фаза - предварительный болюс в объеме 50 мл, далее, после задержки 50 с, 1 фаза - 2/3 объема неразведенного КС, 2 фаза - 1/3 объема КС в разведении с ФР в пропорции 1:1, 3 фаза - 40 мл ФР (25 пациентов). Скорость введения контрастного средства во всех трех группах составляла 3,5-4 мл/с.

Параметры старта сканирования во всех трех группах были идентичны: локализатор на восходящей аорте, абсолютный порог достижения контрастирования 150 HU, минимальная задержка начала сканирования от достижения порога (4,2 с); отсроченная фаза - через 90 с. Старт режима «слежения за болюсом» в 1 и 2 группе начинали одновременно с началом введения КС, в 3 группе - через 50 с. от момента окончания введения предварительного болюса.

Оценка контрастирования камер сердца проводилась качественно (визуальная оценка однородности заполнения контрастом и качества трехмерных моделей сердца) и количественно (измерение плотности содержимого камер на трех уровнях, а также расчет вентрикуло-миокардиального отношения контрастирования для ПЖ и левого желудочка (ЛЖ) по формуле [8]:  $VM = (HU_{Жел} - HU_{Мно}) / HU_{Аорта}$ .

Непосредственно перед КТ всем пациентам выполняли синхронную регистрацию ЭКГ в 6 стандартных отведениях от конечностей и 224 отведениях с поверхности грудной клетки с использованием диагностического комплекса «Амикард 01К». Совмещение электрокардиографических и томографических данных проводилось полуавтоматически на том же диагностическом комплексе (рис. 1).

Для верификации аритмогенного субстрата были построены изохронные активационные карты (при желудочковых аритмиях) и фазовые карты правого и левого предсердия (при фибрилляции и трепетании предсердий). В итоговых трехмерных моделях поверхностного картирования проводилась визуальная оценка правых отделов сердца по шкале от 1 до 3 баллов, где 1 балл - неудовлетворительное качество реконструкции, невозможность получения диагностической информации; 2 балла - хорошее качество реконструкции, модель близка к анатомической с наличием артефактов, не мешающих интерпретации диагностической информации; 3 балла - отличное качество реконструкции.

Далее в условиях рентгеноперационной выполняли электрофизиологическое исследование, электроанатомическое инвазивное картирование и радиочастотную абляцию источников аритмий.

## ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

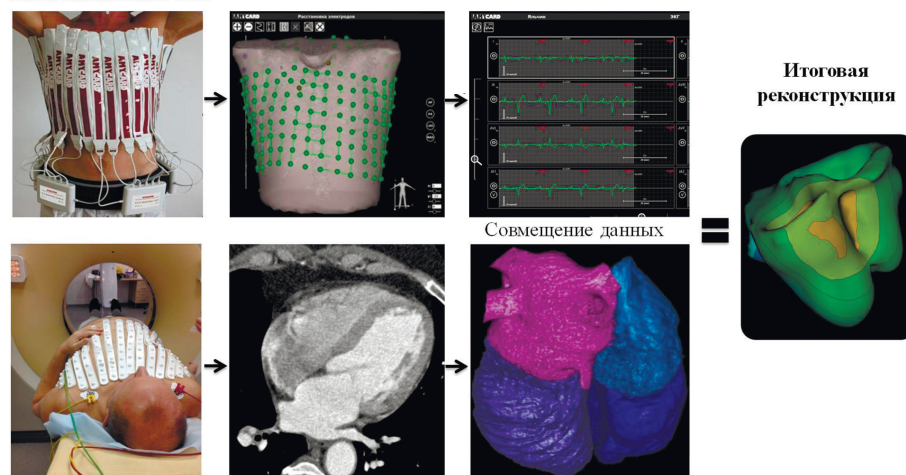
Полученные результаты количественного анализа КУ камер сердца представлены в табл. 2. Показатели средней плотности контрастированной крови в просве-

Таблица 1.

Характеристика групп пациентов

	Всего	Группа I	Группа II	Группа III
Число пациентов, n	93	50	18	25
Возраст, лет	56,4±12,3	55,1±12,3	59,2±10,8	54,8±13,7
Мужчин, n (%)	57 (61)	35 (70)	8 (44,4)	14 (56)
Женщин, n (%)	36 (39)	15 (30)	10 (55,6)	11 (44)
Предсердные аритмии, n (%)	73 (78,5)	43 (86)	13 (72,2)	17 (68)
Желудочковые аритмии, n (%)	20 (21,5)	7 (14)	5 (27,8)	8 (32)

Многоканальная ЭКГ



Компьютерная томография

Рис. 1. Этапы неинвазивного поверхностного картирования сердца.



те ЛП были достоверно выше в группе 1, в группах 2 и 3 были сходны. Значимого различия плотности в полости ЛЖ между группами не отмечено. Вентрикуло-миокардиальное отношение контрастирования показывает степень контрастности полости сердца по отношению к стенке. Чем больше данный коэффициент, тем лучше разница контрастирования между стенкой желудочка и кровью, заполняющей ее просвет, и проще выделение эндокардиального контура при построении трехмерных изображений. Для ЛЖ этот показатель во всех группах был соизмерим и достоверно не различался. Вне зависимости от методики контрастного усиления, отмечалось достаточное контрастирование коронарных артерий, высокая контрастность между миокардом и кровью в левых отделах сердца, на этом фоне хорошо визуализировались папиллярные мышцы, аортальный и митральный клапаны, дополнительные септы, объемные образования, а также тромботические массы.

При использовании монофазного протокола КУ (1 группа) контрастирование правых отделов было недостаточным для получения диагностической информации: средняя плотность крови в ПП  $176 \pm 102$  HU, ПЖ  $172 \pm 86$  HU. Практически во всех случаях средняя плотность контрастированной крови в полости камеры была ниже 200 HU - минимального порогового значения, позволяющего дифференцировать внутренний

контур миокарда от слабоконтрастированной крови, заполняющей правый желудочек и предсердие [17]. Это обусловлено поступлением с каждым сердечным циклом новой порции неконтрастированной крови из нижней полой вены (НПВ). В дальнейшем это приводило к неточному автоматическому выделению границ эндокарда ПП и ПЖ при построении эпи-эндокардиальных моделей сердца, их искажению, и требовало ручной обработки трехмерных реконструкций при поверхностном картировании (рис. 2).

Контрастное усиление по методике сплит-болюс (2 группа) за счет удлинения времени введения КС позволило предотвратить его быстрое вымывание из правых отделов, что улучшило визуализацию трикуспидального клапана и клапана легочной артерии, папиллярных мышц, миокарда ПП и ПЖ (средняя плотность крови в ПП  $258 \pm 59$  HU, ПЖ  $227 \pm 45$  HU). Однако сохранялась гетерогенность контрастного усиления полости ПП за счет артефактов от хвоста болюса КС и крови низкой плотности из НПВ. Это также приводило к менее точному выделению границ эндокарда ПП и требовало в ряде случаев ручной коррекции реконструкций (рис. 3).

Введение предварительного болюса контрастного средства (3 группа) привело к повышению контрастности между миокардом ПП и кровью (средняя плотность крови в ПП  $294 \pm 88$  HU, ПЖ  $264 \pm 74$  HU (рис. 4)).

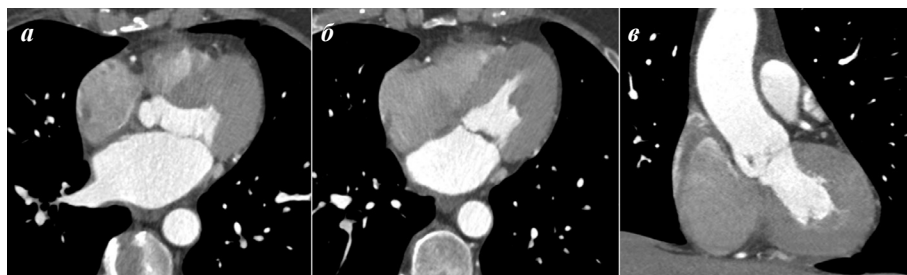
Гомогенность контрастного усиления правого желудочка была сходной с показателями 2 группы. Значения VM-RV при 2 и 3 типах протоколов более чем в 2 раза превышали значения для монофазного протокола. Процесс картирования предсердий при протоколе с предварительным болюсом субъективно занимал наименьшее количество времени (рис. 5). Субъективно оператором было отмечено, что картирование желудочков у пациентов 2 и 3 группы было проще и занимало меньше времени, чем у пациентов 1 группы. Качественный анализ реконструкций, как уже было отмечено выше, выполнялся по визуальной возможности получения диагностической информации по итоговым изохронным активационным и фазовым картам правых отделов сердца. Согласно полученным данным, отображенным на диаграмме (рис. 6), в группе монофазного контрастного усиления лишь в 18% случаев (9 пациентов) качество реконструкций правых отделов сердца было отмечено, как «хорошее», в остальных случаях реконструкции были оценены в 1 балл. В группе контрастирования по методике «сплит-болюс», наоборот, всего 16,7% реконструкций (3 пациента) были оценены как «неудовлетворительные». В группе контрастирования по методике «с предварительным болюсом» все 100% реконструкций правых отделов

Таблица 2.

**Результаты количественного анализа контрастного усиления камер сердца (HU)**

Уровень измерения	Группа I	Группа II	Группа III	P
ЛП	$305,9 \pm 75,4$	$260,3 \pm 72,3$	$277,6 \pm 40,8$	0,044
ЛЖ	$293,8 \pm 72,2$	$248,1 \pm 64,2$	$269,7 \pm 40,3$	0,051
ПП	$176,0 \pm 101,8$	$257,6 \pm 58,7$	$293,7 \pm 88,0$	<0,001
ПЖ	$171,6 \pm 86,0$	$227,1 \pm 45,1$	$263,6 \pm 73,5$	<0,001
VM-LV	$0,628 \pm 0,13$	$0,582 \pm 0,09$	$0,586 \pm 0,131$	0,312
VM-RV	$0,256 \pm 0,265$	$0,541 \pm 0,236$	$0,565 \pm 0,267$	<0,001

Примечание: ЛП - левое предсердие, ЛЖ - левый желудочек, ПП - правое предсердие, ПЖ - правый желудочек, VM-LV - вентрикуло-миокардиальное отношение контрастирования для левого желудочка, VM-RV - вентрикуло-миокардиальное отношение контрастирования для правого желудочка, P - достоверность различий.



**Рис. 2. Компьютерная томография сердца, монофазное контрастное усиление, артериальная фаза (а, б - аксиальные реконструкции, в - коронарная реконструкция). Высокая контрастность между миокардом и кровью в левых отделах сердца. Недостаточное для поверхностного картирования контрастирование правых отделов сердца ввиду постоянного поступления неконтрастированной крови из нижней полой вены.**

сердца были оценены в 2 и 3 балла, неудовлетворительных результатов не было ( $p < 0,001$ ).

### ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Стандартные протоколы контрастного усиления при исследовании сердца (в частности, КТ-коронарографии, как наиболее часто выполняемой томографической процедуры сердца) оптимизированы для левых камер сердца, и применимы при необходимости визуализации ЛП и легочных вен перед аблацией источников фибрилляции предсердий. Данный протокол представляет собой монофазное введение контрастного средства из расчёта 1 мл на кг веса пациента, либо добавление второй фазы в виде небольшого объема ФР [9]. Однако количество вводимого КС и длительность инфузии в данном случае не оптимизировано под оценку патологии правых отделов, постоянное поступление неконтрастированной крови из НПВ и растягивание хвоста болюса КС в верхней полой вене (ВПВ) приводит к значительной негомогенности содержимого камер и низкой контрастности по отношению к миокарду, к тому же значительная часть КС успевает покинуть правые отделы. Контрастное усиление ПП и ПЖ при этом варьирует в широких пределах, что мы и наблюдали в 1 группе пациентов (рис. 2).

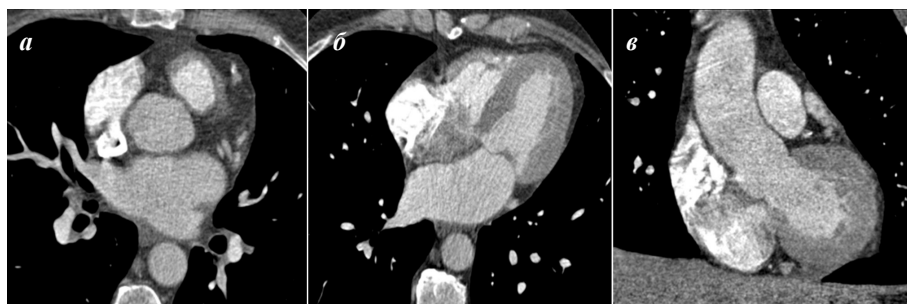
При планировании катетерной аблации важно получить достаточное и однородное контрастирование полости левых и правых отделов сердца, так как зоны аритмогенной активности могут быть расположены в любом отделе миокарда [1, 10]. Улучшение визуализации правых камер сердца может быть достигнуто коррекцией количества и скорости введения КС для пролонгирования времени поступления КС и поддержания адекватного контрастирования всего сердца в течение сканирования [11]. Однако монофазное введение только КС с постоянной скоростью не позволяет получить достаточного гомогенного контрастирования правых отделов сердца, часто приводит к появлению линейных артефактов от крови высокой плотности в верхней полой вене, затекающей прилежащие структуры и искажающим трехмерные реконструкции [12-14].

Использование двухколбовых инжекторов с возможностью одновременного введения КС и ФР, позволило существенно изменить подход к технике внутривенного контрастирования [15]. Было про-

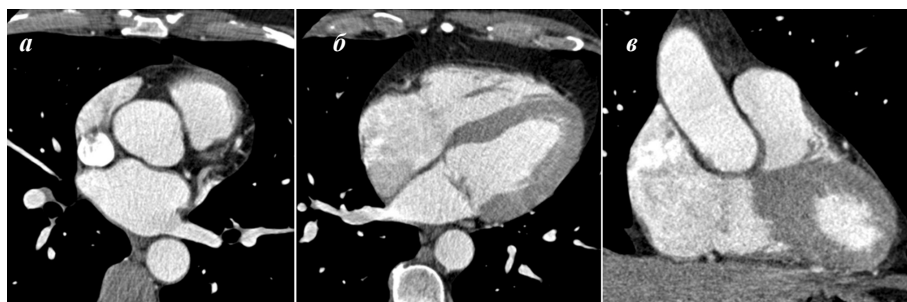
демонстрировано, что использование преследователя болюса (ФР) снижает частоту линейных артефактов от высоко контрастированной крови, а также уменьшает общее количество КС, необходимого для оптимального контрастирования [12, 14, 16, 17], в то же время поддерживается высокое и однородное контрастирование артериальной системы [12, 18]. С другой стороны, во многих случаях преследователь болюса и сопутствующие ему снижение объема вводимого КС и модернизация времени сканирования приводят к ускоренному вымыванию КС из правых отделов и снижают коэффициент ослабления в ПП и ПЖ. Это затрудняет прослеживание контуров эндокарда, анализ анатомии и патологических изменений правых отделов сердца и легочного ствола [12, 14].

Клинические задачи заставили задуматься о переходе с монофазного протокола контрастирования к более сложным комбинациям КС, ФР и их смеси для получения адекватного контрастного усиления интересующих отделов сердца на протяжении сканирования.

Протокол дробного введения контрастного средства (сплит-болюс) изначально применялся для визуализации мочевыделительной системы [19], затем исследователи стали применять его для улучшения визуализации сердца. Данный протокол в настоящее время используется с включением следующих этапов: 1) введение КС, 2) введение смеси КС-ФР в различном соотношении, 3) введение ФР. В нашем исследовании



**Рис. 3. Компьютерная томография сердца, контрастное усиление по методике сплит-болюс, артериальная фаза (а, б - аксиальные реконструкции, в - коронарная реконструкция). Достаточное и однородное контрастирование левых отделов сердца, правого желудочка. Сохраняется гетерогенность заполнения контрастным средством полости правого предсердия из-за артефактов от «хвоста» болюса в верхней полой вены и неконтрастированной крови из нижней полой вены.**



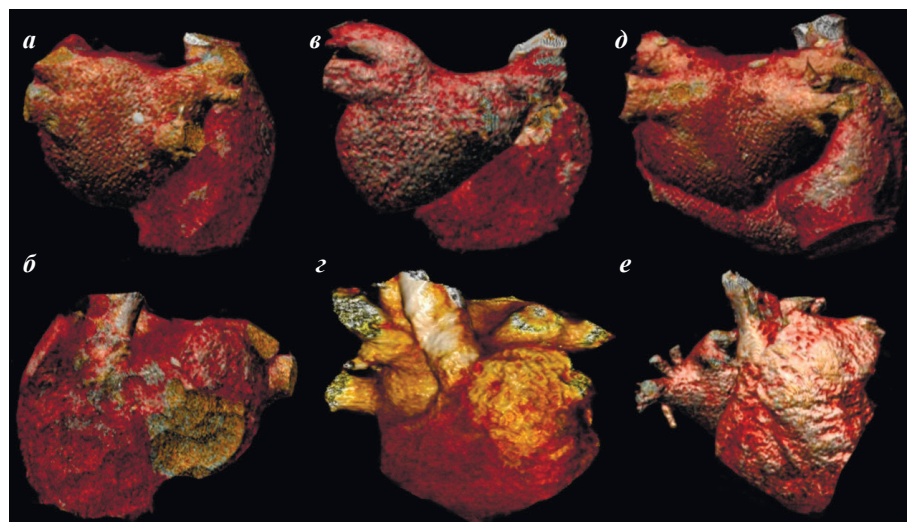
**Рис. 4. Компьютерная томография сердца, контрастное усиление по методике с предварительным болюсом, артериальная фаза (а, б - аксиальные реконструкции, в - коронарная реконструкция). Повышение степени контрастирования и гомогенности правых отделов сердца. Сохранение достаточного и однородного заполнения контрастным средством левых отделов сердца.**



применение методики сплит-болюс позволило повысить качество визуализации правого желудочка за счет повышения контрастности границы миокард - полость камеры (рис. 3).

D.Utsunomiya с соавт. (2006) одними из первых сравнили монофазное контрастное усиление - с преследователем болюса (группа В) и без (группа С) - и протокол сплит-болюс (группа А) для визуализации камер сердца и коронарных артерий. Сплит-болюс включал разведение КС:ФР в соотношении 50:50% во второй фазе и медленное введение со скоростью 1,5 мл/с. Отмечено, что наибольший коэффициент ослабления в полости ПЖ получен при протоколе сплит-болюс, однако различия статистически недостоверны. Разность максимального и минимального коэффициента ослабления в полости ЛЖ при всех трех протоколах колебалась незначительно, в ПЖ была соизмерима с ЛЖ при протоколе А, и колебалась в значительных пределах при В и С. Таким образом, оптимальное контрастное усиление камер ЛЖ и ПЖ с четкой визуализацией эндокардиального контура межжелудочковой перегородки отмечалось при продолжительном дробном введении КС. При монофазном введении с преследователем болюса или без него у половины пациентов определение точных границ межжелудочковой перегородки затруднительно ввиду низкого контраста миокард / полость ПЖ [8].

J.M.Kerl с соавт. (2008) [12] ретроспективно проанализировали данные КТ сердца 75 пациентов, при которых использовалось три протокола контрастного усиления, аналогичные D.Utsunomiya с соавт. (2006) [8], однако протокол сплит-болюс включал введение смеси КС:ФР в пропорции 70:30%, скорость 5 мл/с.



**Рис. 5. Промежуточный результат неинвазивного картирования сердца: объемные эпикардальные модели предсердий (а, в, д - левого, б, г, е - правого) при монофазном контрастном усилении (а, б), сплит-болюс (в, г), с предварительным болюсом (д, е). При монофазном протоколе правое предсердие (б) не законтрастировано, ввиду чего отображается необъемным на итоговых реконструкциях. При протоколах сплит-болюс и с предварительным болюсом правое предсердие законтрастировано сильнее (г, е). Однако при использовании протокола с предварительным болюсом (е) отражено более гомогенное заполнение контрастом (по меньшей разности цветового спектра) и более детальное отображение структур правого предсердия.**

Хотя при монофазном введении КС без ФР была получена высокая степень контрастного усиления левых и правых камер сердца (что может быть связано с применением методики «тест-болюс» для определения времени задержки старта сканирования), частота артефактов в ВПВ достигала 100%, в ПП 94%. В группах с преследователем болюса и сплит-болюс частота артефактов в ВПВ/ПП составила 34/59% и 91/67%, соответственно. Изображение структур левых камер сердца (папиллярных мышц, аортального клапана, миокарда ЛЖ) и коронарных артерий существенно не отличалось по качеству при сравнении трех групп. Структуры правых отделов (папиллярные мышцы, мышечная перекардина, трикуспидальный и клапан легочной артерии, миокард ПЖ) визуализировались значительно лучше в группе сплит-болюс [12].

Ввиду варьирования степени контрастирования правых отделов сердца в зависимости от степени разведения КС при дробном введении, J.G.Lu с соавт. (2010) сравнили между собой разные варианты протокола сплит-болюс, изменяя содержание КС в смеси от 30% до 70%, а также с монофазным введением, с целью определения оптимальной методики. В результате средняя плотность крови в коронарных артериях была существенно выше при монофазном введении с преследователем болюса, а при протоколах сплит-болюс отличалась незначимо, и это не влияло на качество визуализации сосудов. Применение преследователя болюса также сводило частоту возникновения линейных артефактов от ВПВ к минимуму (2,1%), в отличие от монофазного КУ без ФР (41,7%). При использовании протокола сплит-болюс артефакты возникали в 12,5-23%, частота существенно не отличалась при изменении степени разведения КС.

При оценке внутрисердечных структур исследователи отметили, что дробное введение КС приводит к более продолжительному контрастному усилению полости ПП, ПЖ и ЛП, четкая визуализация структур правых камер определялась при всех протоколах сплит-болюс. Однако, чем больше степень разведения КС во второй фазе, тем ниже коэффициент ослабления в данных камерах, тогда как плотность крови в ЛЖ и восходящей аорте существенно не отличалась. [14].

М.Кок с соавт. (2015) также получил высокое качество контрастирования ПЖ при использовании протокола сплит-болюс: средний коэффициент ослабления более 200 HU отмечен почти в 80% случаев (372 томограммы из 472). Контрастирование проводилось с индивидуальным подбором количества вводи-

мого КС ( $108 \pm 24$  мл) и скорости введения ( $6,1 \pm 2,2$  мл/с) в зависимости от веса и предполагаемой длительности сканирования, соотношение КС/ФР составляло 20/80% [20].

D.Gopalan (2011) выделил основные факторы, позволяющие получить оптимальное контрастное усиление правого желудочка. К ним относятся: использование контрастного средства с высокой концентрацией йода ( $320-370$  мг/мл); введение КС по методике сплит-болюс; если необходимо одновременное контрастирование легочного ствола, пропустить введение преследователя болюса; поддержание высокой скорости введения (не менее  $5$  мл/с) в течение всего периода инфузии для снижения эффекта венозного возврата из НПВ; согласование скорости введения ФР и контрастного средства при мультифазных протоколах для уменьшения феномена «мертвого пространства» (небольшая порция КС, задерживающаяся между брахиоцефальной и верхней поллой веной, особенно при снижении скорости введения во время второго этапа сплит-болюса) [13].

Методика введения предварительного болюса применяется сравнительно недавно. Изначально её цель - оптимизация лучевой нагрузки на пациента при исследовании легочных вен и ЛП, а именно - исключения внутрисердечного тромбоза. Псевдодефекты наполнения, возникающие при неполном перемешивании КС и крови на фоне нарушения сократимости предсердия, повышенная трабекулярность и объемные гребенчатые мышцы могут имитировать тромботические массы [21, 22]. Отсроченное сканирование с высокой чувствительностью позволяет дифференцировать данные изменения, однако повышает лучевую нагрузку на пациента [23, 24]. J.Nur с соавт. (2012) использовали данную методику для выявления тромбоза ушка у пациентов с ишемическим инсультом, а также перед катетерной аблацией фибрилляции предсердий. Применялось два болюса КС: 1) тест-болюс в объеме  $50$  мл; 2) основной болюс в объеме  $70$  мл, который вводился через  $180$  с. после окончания введения тест-болюса. Старт сканирования осуществлялся одновременно с началом основного болюса, таким образом за один цикл сканирования получали артериальную фазу для визуализации полости ЛП и устьев легочных вен и отсроченную - для ушка ЛП [25, 26].

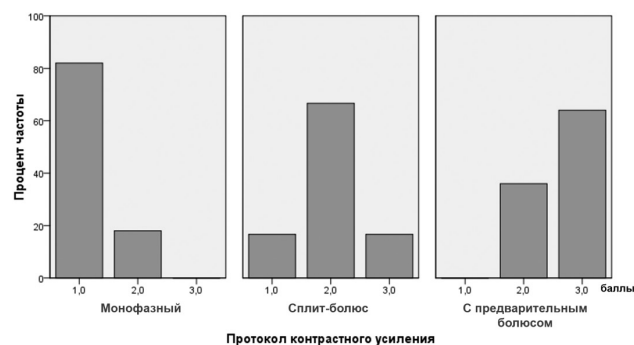
W.Staab с соавт. (2014) также использовал протокол с предварительным болюсом в объеме  $30$  мл КС при медленной скорости введения ( $2$  мл/с), а затем после паузы  $20$  с. введение  $70$  мл КС с обычной скоростью ( $4$  мл/с) для обследования пациентов перед аблацией фибрилляции предсердий. Во всех исследованиях были получены практически  $100\%$  значения чувствительности, специфичности, положительного и отрицательного прогностического значения для визуализации тромботических масс. Однако влияние данной методики контрастного усиления на качество визуализации правых камер не оценивалось [27].

В нашем предыдущем исследовании оценивалось качество контрастирования правого предсердия перед катетерной аблацией фибрилляции предсердий при использовании предварительного болюса.

Так как основной проблемой, препятствующей гомогенному контрастному усилению ПП, является поступление гиподенсной крови из НПВ, нами было сделано предположение, что предварительный болюс, за счет рециркуляции во время паузы, повысит плотность НПВ к старту основного болюса и старту сканирования. По результатам исследования было отмечено повышение гомогенности содержимого ПП за счет смешивания в полости контрастированной крови из систем верхней и нижней полых вен. За счет снижения объема КС в основном болюсе минимизируется риск появления артефактов от ВПВ, при этом сохраняется достаточное качество контрастирования левых отделов сердца [28].

Данное исследование является продолжением предыдущего. Для более детальной оценки модифицированного протокола контрастного усиления и его влияния на результаты поверхностного картирования необходимо было его сравнение с методикой сплит-болюс. Оба протокола позволяли получить высокую контрастность между миокардом и кровью в полости правого желудочка, качество трехмерных моделей поверхностного картирования значительно не отличалось. Однако предварительный болюс значительно повышал гомогенность полости правого предсердия и контрастность границы миокард-полость камеры, что позволило получить более детальные анатомические модели и время, затрачиваемое на картирование, субъективно было ниже при данном типе контрастного усиления.

Таким образом, протоколы пролонгированного дробного введения контрастного средства по типу сплит-болюс и с предварительным болюсом повышают качество визуализации структур правого желудочка, поддерживая высокий уровень контрастного усиления в левых отделах. В клинических случаях, когда необходима точная дифференцировка внутренних контуров правого предсердия при поверхностном картировании источников предсердных аритмий, предпочтительно использование предварительного болюса, при котором гомогенность контрастирования полости выше по сравнению с монофазным и протоколом сплит-болюс. При необходимости снижения нагрузки контрастным препаратом у пациентов с высоким риском острого повреждения почек либо других контраст-индуциро-



**Рис. 6. Столбчатая диаграмма, демонстрирующая результаты качественной «балльной» оценки итоговых реконструкций поверхностного картирования и распределение результатов в каждой группе (процентное соотношение).**

ванных состояний, возможно использование протокола контрастирования с технологией сплит-болюс при предоперационной топической диагностике источников предсердных аритмий ввиду меньшего объема требуемого контрастного средства.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Протоколы контрастного усиления по типу сплит-болюс и с предварительным болюсом улучшают

визуализацию правого желудочка, поддерживая высокий уровень контрастирования в левых отделах. Это обеспечивает точную и воспроизводимую оценку объема и функции правого и левого желудочка, анатомических структур, патологических изменений. Однако, когда необходима точная дифференцировка внутренних контуров правого предсердия при поверхностном картировании источников предсердных аритмий, предпочтительно использование предварительного болюса.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Calkins H, Kuck KH, Cappato R, et al. Heart Rhythm Society Task Force on Catheter and Surgical Ablation of Atrial Fibrillation. 2012 HRS/EHRA/ECAS expert consensus statement on catheter and surgical ablation of atrial fibrillation: recommendations for patient selection, procedural techniques, patient management and follow-up, definitions, endpoints and research trial design. *Heart Rhythm*. 2012;9(4): 632-696. <https://doi.org/10.1016/j.hrthm.2011.12.016>.
2. Ramanathan C, Ghanem RN, Jia P, et al. Noninvasive electrocardiographic imaging for cardiac electrophysiology and arrhythmia. *Nature Medicine*. 2004; 10: 422-428.
3. Ревишвили АШ, Калинин ВВ, Сопов ОВ, и др. Первый опыт хирургического лечения нарушений ритма сердца при помощи неинвазивной системы диагностики поверхностного картирования «АМИКАРД-01». *Анналы аритмологии*. 2011;1: 47-52 [Revishvili AS, Kalinin VV, Sopov O, et al. First experience in surgical management of heart rhythm disorders with a non-invasive surface mapping diagnostic system «AMYCARD-01». *Annaly aritmologii*. 2011;1: 47-52. (In Russ.)].
4. Rudy Y. Noninvasive ECG imaging (ECGI): Mapping the arrhythmic substrate of the human heart. *International Journal of Cardiology*. 2017;237: 13-14.
5. Revishvili AS, Wissner E, Lebedev et al. Validation of the mapping accuracy of a novel non-invasive epicardial and endocardialelectrophysiology system. *Europace*. 2015;17(8): 1282-1288. <https://doi.org/10.1093/europace/euu339>.
6. Артюхина ЕА, Ревишвили АШ. Комплексный подход в лечении нарушений ритма с использованием неинвазивного и инвазивного картирования сердца. *Высокотехнологическая медицина*. 2017;3: 51-53. [Artyukhina EA, Revishvili AS. Complex approach to treatment of the arrhythmias with non invasive and invasive mapping. *Vysokotekhnologicheskaya medicina*. 2017;3: 51-53. (In Russ.)].
7. Яшков МВ. Использование отечественных систем неинвазивного и инвазивного картирования для интервенционного лечения желудочковых аритмий. *Трансляционная медицина*. 2018;5(2): 22-29. [Yashkov MV. Use of russian non-invasive and invasive mapping systems for interventional treatment of ventricular arrhythmias. *Translational Medicine*. 2018;5(2): 22-29. (In Russ.)]. <https://doi.org/10.18705/2311-4495-2018-5-2-22-29>
8. Utsunomiya D, Awai K, Sakamoto T, et al. Cardiac 16-MDCT for anatomic and functional analysis: assessment of a biphasic contrast injection protocol. *AJR Am J Roentgenol*. 2006; 187(3): 638-44. <https://doi.org/10.2214/AJR.05.0612>.
9. Muhl C, Maas M, Turek J, et al. Contrast media administration in coronary computed tomography angiography - a systematic review. *Fortschr Röntgenstr*. 2017;189: 312-325. <https://doi.org/10.1055/s-0042-121609>.
10. Cronin EM, Bogun FM, Maury P, et al. 2019 HRS/EHRA/APHRS/LAHRS expert consensus statement on catheter ablation of ventricular arrhythmias: Executive summary. *Heart Rhythm*. 2019;pii: S1547-5271(19)30236-X. <https://doi.org/10.1016/j.hrthm.2019.03.014>.
11. Johnson T, Nikolaou K, Wintersperger BJ, et al. ECG-gated 64-MDCT angiography in the differential diagnosis of acute chest pain. *AJR Am J Roentgenol*. 2007;188(1): 76-82. <https://doi.org/10.2214/AJR.05.1153>.
12. Kerl JM, Ravenel JG, Nguyen SA, et al. Right heart: split-bolus injection of diluted contrast medium for visualization at coronary CT angiography. *Radiology*. 2008;247(2): 356-64. <https://doi.org/10.1148/radiol.2472070856>.
13. Gopalan D. Right heart on multidetector CT. *The British Journal of Radiology*. 2011;84: 306-323. <https://doi.org/10.1259/bjr/59278996>.
14. Lu JG, Lv B, Chen XB, et al. What is the best contrast injection protocol for 64-row multi-detector cardiac computed tomography? *Eur J Radiol*. 2010;75: 159-65. <https://doi.org/10.1016/j.ejrad.2009.04.035>.
15. Haage P, Schmitz-Rode T, Hubner D, et al. Reduction of contrast material dose and artifacts by a saline flush using a double power injector in helical CT of the thorax. *AJR Am J Roentgenol*. 2000;174: 1049-1053.
16. Setty BN, Sahani DV, Ouellette-Piazza K, et al. Comparison of enhancement, image quality, cost, and adverse reactions using 2 different contrast medium concentrations for routine chest CT on 16-slice MDCT. *J Comput Assist Tomogr*. 2006;30(5): 818-22. <https://doi.org/10.1097/01.rct.0000229999.30897.3b>.
17. Funabashi N, Suzuki K, Terao M, et al. New acquisition method to exclusively enhance the left side of the heart by a small amount of contrast material achieved by multislice computed tomography with 64 data acquisition system. *Int J Cardiol*. 2007;114: 265-269. <https://doi.org/10.1016/j.ijcard.2005.11.066>.
18. Cademartiri F, Mollet N, van der Lugt A, et al. Non-invasive 16-row multislice CT coronary angiography: usefulness of saline chaser. *Eur Radiol*. 2004;14: 178-183. <https://doi.org/10.1007/s00330-003-2188-x>.
19. Dillman JR, Caoili EM, Cohan RH, et al. Comparison of urinary tract distension and opacification using single-bolus 3-Phase vs split-bolus 2-phase multidetector row CT urography. *J Comput Assist Tomogr*. 2007;31(5): 750-7. <https://doi.org/10.1097/RCT.0b013e318033df36>.



20. Kok M, Kietselaer BL, Muhl C, et al. Contrast enhancement of the right ventricle during coronary CT angiography - is it necessary? *PLoS One*. 2015;10(6): e0128625. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0128625>.
21. Wu X, Wang C, Zhang C, et al. Computed tomography for detecting left atrial thrombus: a meta-analysis. *Arch Med Sci*. 2012;8(6): 943-51. <https://doi.org/10.5114/aoms.2012.32400>.
22. Teunissen C, Habets J, Velthuis BK, et al. Double-contrast, single-phase computed tomography angiography for ruling out left atrial appendage thrombus prior to atrial fibrillation ablation. *Int J Cardiovasc Imaging*. 2017;33(1): 121-128. <https://doi.org/10.1007/s10554-016-0973-2>.
23. Romero J, Husain SA, Kelesidis I, et al. Detection of left atrial appendage thrombus by cardiac computed tomography in patients with atrial fibrillation: a metaanalysis. *Circ: Cardiovasc Imaging*. 2013;6: 185-94. <https://doi.org/10.1161/CIRCIMAGING.112.000153>.
24. Bilchick KC, Meador A, Gonzalez J, et al. Effectiveness of integrating delayed computed tomography angiography imaging for left atrial appendage thrombus exclusion into the care of patients undergoing ablation of atrial fibrillation. *Heart Rhythm*. 2016;13: 12-19. <https://doi.org/10.1016/j.hrthm.2015.09.002>.
25. Hur J, Kim YJ, Lee HJ, et al. Cardioembolic stroke: dual-energy cardiac CT for differentiation of left atrial appendage thrombus and circulatory stasis. *Radiology*. 2012;263(3): 688-695. <https://doi.org/10.1148/radiol.12111691>.
26. Hur J, Pak HN, Kim YJ, et al. Dual-enhancement cardiac computed tomography for assessing left atrial thrombus and pulmonary veins before radiofrequency catheter ablation for atrial fibrillation. *Am J Cardiol*. 2013;112(2): 238-44. <https://doi.org/10.1016/j.amjcard.2013.03.018>.
27. Staab W, Sohns C, Zwaka PA, et al. Split-bolus single-phase cardiac multidetector computed tomography for reliable detection of left atrial thrombus: comparison to transesophageal echocardiography. *Rofo*. 2014;186 (11): 1009-1015. <https://doi.org/10.1055/s-0034-1366247>.
28. Каштанова НЮ, Груздев ИС, Кондратьев ЕВ, и др. Мультиспиральная компьютерная томография сердца: оптимизация протокола сканирования при проведении неинвазивного картирования сердца перед катетерной аблацией фибрилляции предсердий. *Медицинская визуализация*. 2018; 22(3): 33-48. [Kashtanova NYu, Gruzdev IS, Kondrat'ev EV, et al. Cardiac multispiral computed tomography: optimization of examination's protocol for non-invasive cardiac mapping before catheter ablation of atrial fibrillation. *Medical Visualization*. 2018;(3):33-48. (In Russ.)]. <https://doi.org/10.24835/1607-0763-2018-3-33-48>.