

УДК 616-008.9-021.6-02:616.12/.13]-092.9
<https://doi.org/10.20538/1682-0363-2022-3-140-153>

Лучевые методы диагностики в оценке состоятельности коронарных шунтов

Веснина Ж.В., Гракова Е.В.

Научно-исследовательский институт (НИИ) кардиологии,
Томский национальный исследовательский медицинский центр (НИМЦ) Российской академии наук
634012, Россия, г. Томск, ул. Киевская, 111а

РЕЗЮМЕ

В обзоре представлено описание лучевых инструментов и методов, доступных в настоящее время, для получения тщательной и полной анатомической и функциональной оценки состоятельности различных коронарных шунтов, а также некоторые детали выполнения и клинической интерпретации результатов этих исследований.

Ключевые слова: аортокоронарное шунтирование, артериальные и венозные кондуиты, лучевые методы диагностики

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Источник финансирования. Авторы заявляют об отсутствии финансирования при проведении исследования.

Для цитирования: Веснина Ж.В., Гракова Е.В. Лучевые методы диагностики в оценке состоятельности коронарных шунтов. *Бюллетень сибирской медицины*. 2022;21(3):140–153. <https://doi.org/10.20538/1682-0363-2022-3-140-153>.

Diagnostic radiology methods for assessing coronary artery bypass graft viability

Vesnina Zh.V., Grakova E.V.

Cardiology Research Institute, Tomsk National Research Medical Center (NRMC), Russian Academy of Sciences
111a, Kievskaya Str., Tomsk, 634012, Russian Federation

ABSTRACT

The review describes available modern radiological methods which are currently applied for a detailed and comprehensive anatomical and functional assessment of the viability of various coronary artery bypass grafts. In addition, it presents some aspects of the implementation of these methods and clinical interpretation of the results.

Keywords: coronary artery bypass grafting, arterial and venous conduits, diagnostic radiology methods

✉ Веснина Жанета Владимировна, zhvesnina@mail.ru

Conflict of interest. The authors declare the absence of obvious or potential conflicts of interest related to the publication of this article.

Source of financing. The authors state that they received no funding for the study.

For citation: Vesnina Zh.V., Grakova E.V. Diagnostic radiology methods for assessing coronary artery bypass graft viability. *Bulletin of Siberian Medicine*. 2022;21(3):140–153. <https://doi.org/10.20538/1682-0363-2022-3-140-153>.

ВВЕДЕНИЕ

Ишемическая болезнь сердца (ИБС) является одной из ведущих причин заболеваемости и смертности, затрагивая почти 20% лиц старше 65 лет [1], и это составляет 370 тыс. смертей в год [2]. Клинико-прогностические преимущества операции коронарного шунтирования (КШ) общепризнаны, поскольку хирургический метод позволяет достичь полной реваскуляризации у больных ИБС с многососудистым поражением и осуществляется в количестве почти 1 млн ежегодно [3]. Хотя 5-летняя выживаемость после АКШ составляет 75–80% [4, 5], почти у 20% больных развивается хроническая сердечная недостаточность (СН) в течение 2 лет после операции [6]. Коронарное шунтирование обеспечивает отличные кратко- и среднесрочные результаты, но отдаленные результаты в значительной степени зависят от показателей проходимости использованных сосудистых трансплантатов.

Венозные трансплантаты более подвержены развитию патологических изменений в связи с тем, что строение самого сосуда не рассчитано на высокое артериальное давление. Нарушение тонуса стенки, расширение сосуда, замедление кровотока в конечном итоге могут вызвать тромбоз шунта. Со временем венозный шунт может адаптироваться к артериальному кровотоку, но становится подверженным атеросклеротическому поражению [7, 8]. Использование артерий, близких по анатомическому строению к коронарным сосудам, дает гораздо лучший результат, однако и артерии отличаются по своим биологическим характеристикам друг от друга.

В настоящее время при операциях КШ все чаще применяются внутренние грудные (маммарные) артерии (ВГА) как наиболее жизнеспособные и имеющие ряд преимуществ. Впечатляющая долговременная проходимость левой ВГА в качестве шунта к левой передней нисходящей коронарной артерии (ЛВГА – ПНА) в сочетании с доказанной долгосрочной жизнеспособностью обусловило то, что данный конduit стал золотым стандартом АКШ. Однако в настоящее время спектр используемых артериальных кондуитов расширился за пределы ВГА за счет включения в него правой желудочно-сальниковой

артерии (ЖСА), нижней эпигастральной артерии (нЭГА) и лучевой артерии (ЛА).

ВНУТРЕННИЕ ГРУДНЫЕ АРТЕРИИ

Основываясь на долгосрочных показателях проходимости, было показано, что ВГА являются отличным кондуитом для реваскуляризации миокарда по сравнению с трансплантатом подкожной вены (ТПВ). Частота развития атеросклероза в ВГА невелика даже у пациентов, перенесших КШ, с тяжелой формой ИБС [9].

Преимущества в плане продолжительности жизни пациентов, связанные с использованием ЛВГА в качестве шунта к левой ПНА, были доказаны в клинике Кливленда более 30 лет назад [10]. Улучшенный результат с использованием ВГА с высокой вероятностью обусловлен ее долгосрочным уровнем проходимости более 90% в течение 10 лет после операции [10]. Превосходную состоятельность ВГА, вероятно, можно объяснить ее специфическими морфологическими особенностями.

Артерия имеет прерывистый внутренний эластичный слой, относительно тонкую медиа и отсутствие значительного мышечного компонента, что объясняет ее сниженную склонность к спазму и развитию атеросклероза [11]. Более того, по сравнению со всеми остальными артериальными и венозными кондуитами, ВГА обладает способностью к увеличенной продукции противовоспалительных и вазоактивных молекул [12, 13]. Действительно, эндотелиальные клетки ВГА высвобождают больше простаглицлина [12] и оксида азота [13], чем таковые в ТПВ.

Самые высокие показатели проходимости были задокументированы, когда ВГА (либо *in situ*, либо в виде Y-образного или свободного трансплантата) подшивалась к левой коронарной артерии и ее ветвям [14]. Низкие показатели были задокументированы, когда ВГА использовалась для шунтирования правой коронарной артерии (вероятно, из-за несоответствия размеров и прогрессирования заболевания или из-за малого объема жизнеспособного миокарда) [14].

Отдельно следует остановиться на использовании естественных бифуркаций ВГА при их билатераль-

ном использовании для реваскуляризации миокарда. Только в одном рандомизированном исследовании сравнивали результаты между использованием для шунтирования отдельно одной из ВГА и обеих ее ветвей (билатерально – БВГА). В исследовании ART (Arterial Revascularization Trial) первичная точка – 10-летняя выживаемость и промежуточный анализ через 1 год (конечная точка «безопасности») показали отличные результаты при использовании обеих стратегий. Смертность, инсульт, инфаркт миокарда и повторная реваскуляризация составили менее 2,5% в сравниваемых группах [14].

Помимо исследования ART начатый более 10 лет назад систематический обзор подходящих когорт из почти 15 тыс. пациентов с АКШ с трансплантатами БВГА показал значительное снижение коэффициента риска (HR) смертности [3]. За последние 2 года два независимых метаанализа подтвердили этот вывод, основываясь не только на более крупных когортах пациентов, но и на более длительном наблюдении [15, 16].

Основная проблема с использованием трансплантатов БВГА состоит в повышенном риске осложнений раны грудины и развития медиастенита. Один из крупнейших метаанализов по данной проблеме показал, что добавление второго трансплантата ВГА к ВГА – ПНА значительно увеличивает возникновение стерильных осложнений, и этот риск еще выше у больных сахарным диабетом и у пациентов с легочными заболеваниями [17]. В исследовании ART осложнения, связанные с раной грудины, увеличились с 0,6% в группе с одной ВГА до 1,9% в группе БВГА [14].

Однако частота серьезных проблем с раной может быть значительно снижена благодаря разумному отбору пациентов и выбору техники выделения кондуитов. Следует рассмотреть возможность избегания БВГА у пациентов с определенными факторами риска, особенно если они имеют место одновременно (диабет, ожирение, респираторные проблемы), а также у пациентов, получающих стероиды или иммуносупрессорную терапию. Кроме того, в двух систематических обзорах сообщается, что «скелетизация» ВГА, в отличие от техники выделения лоскутом, значительно снижает глубинные инфекции раны грудины даже у пациентов с диабетом [17, 18].

ЛУЧЕВАЯ АРТЕРИЯ

Внедренная в коронарную хирургию в 1970-х гг. [19] лучевая артерия была «заново открыта» в начале 1990-х [20]. Опасения по поводу спазма сосуда, обусловленного мышечной природой стенки ЛА, уменьшились после демонстрации прогрессивного

морфофункционального ремоделирования артерии в направлении эластомышечного профиля после имплантации в коронарное кровообращение [21]. Крупнейшие ангиографические исследования сообщают о степени проходимости ЛА от 80 до 90% через 7–10 лет наблюдения [22]. По данным других авторов, через 2 года после операции частота окклюзий и стенозирования шунтов *a. radialis* составила 35 и 15% соответственно [23].

Степень стенозирования сосуда-мишени является ключевым фактором при определении проходимости ЛА. Существует общее мнение, что ЛА следует использовать только для обхода сосуда со стенозом > 70%, а также есть доказательства того, что 90%-й предел стеноза обеспечивает еще лучшую степень проходимости ЛА, особенно в правой коронарной системе [24, 25]. При этом место проксимального анастомоза и метод забора (открытый и эндоскопический) не влияют на показатели проходимости ЛА, а скелетизация артерии может привести к лучшим показателям проходимости [26].

Лучевая артерия является артериальным кондуитом, для которого имеется наибольшее количество доказательств преимущества, полученных по данным рентгеновской компьютерной томографии. Результаты использования ЛА сравнивали либо с ТПВ, либо с правой внутренней грудной артерией (ПВГА) в четырех рандомизированных контролируемых исследованиях (РКИ) [25, 27–29]. Ряд метаанализов, объединивших данные РКИ и крупных обсервационных наблюдений для сравнения ЛА и ТПВ [30–34], со средним временем наблюдения, выходящим за пределы первого послеоперационного года, показали значительные преимущества с точки зрения проходимости трансплантата из ЛА. Единственный метаанализ, включавший клинические исходы, выявил снижение сердечной смерти, частоты инфаркта миокарда и повторных коронарных процедур, а также лучшую проходимость трансплантата ЛА в отдаленный послеоперационный период [33].

Исследование RAPCO (Radial Artery Patency and Clinical Outcomes) не выявило различий в проходимости ЛА и ПВГА, а только незначительную тенденцию к лучшей выживаемости без сердечных событий в группе ЛА в течение 6 лет наблюдения [29]. Единственный сравнительный метаанализ с учетом клинических конечных точек показал сопоставимую смертность, но при этом снижение частоты сердечных событий (инфаркт миокарда, сердечная недостаточность, ишемия) при использовании ЛА [31]. Однако метаанализ ангиографических исследований показал, что использование ПВГА было связано с незначительным снижением абсолютного риска (на

27%) поздней окклюзии трансплантата по сравнению с ЛА [34].

По сравнению с ПВГА лучевая артерия представляется более предпочтительным выбором для пациентов с риском послеоперационных осложнений со стороны грудины (диабет, ожирение, хроническое заболевание легких). Действительно, выделение ЛА чрезвычайно безопасно и хорошо переносится даже тяжелыми пациентами [31] и (в отличие от ПВГА) не влияет на васкуляризацию и заживление грудины [35, 36]. Кроме того, недавнее исследование RAPS (Radial Artery Patency Study), посвященное только больным сахарным диабетом, показало, что использование ЛА является очень результативным в плане профилактики окклюзии трансплантата [37]. Это делает использование данной артерии в качестве шунта у диабетиков особенно привлекательным.

Большинство исследователей относят к основным недостаткам лучевых шунтов отсутствие естественного кровоснабжения сосудистой стенки через *vasa vasorum*. В работе М. Gaudino и соавт. [38] показана склонность лучевых шунтов к спазму. Кроме того, отмечается выраженная пролиферативная реакция сосудистой стенки, приводящая к стенозированию и окклюзии шунтов уже в первый год после операции, причем назначение антагонистов кальция с целью предупреждения спазма *a. radialis* не привело к улучшению проходимости шунтов в первый год после АКШ [39].

ЖЕЛУДОЧНО-САЛЬНИКОВАЯ АРТЕРИЯ

J. Rym и соавт. [40] и Н. Suma и соавт. [41] впервые независимо друг от друга сообщили о систематическом использовании трансплантата желудочно-сальниковой артерии для АКШ в 1987 г. С тех пор трансплантаты ЖСА получили широкое применение в клинической практике. Очень немногие кандидаты на АКШ имеют противопоказания к использованию ЖСА [42]; конduit имеет низкий уровень тяжелого атеросклероза [43] и хорошую пропускную способность [44].

Биологический и физиологический профиль ЖСА в настоящее время тщательно изучен [45], и использование этой артерии не увеличивает периоперационный риск [46]. Заболеваемость атеросклерозом в ЖСА встречается редко, однако, несколько чаще, чем в ВГА [43]. Наиболее благоприятной мишенью для трансплантата ЖСА *in situ* является дистальный отдел ПКА, но этот шунт можно использовать и для дистальной части системы огибающей артерии. Субокклюзия (> 90%) коронарной артерии-мишени важна для максимизации показателей проходимости, а также для предотвращения спазма

и возможной недостаточности из-за хронического конкурентного коронарного кровотока. Эта проблема официально признана в Руководстве АССF/АНА 2011 г. по коронарному шунтированию, в котором артериальное шунтирование ПКА противопоказано (класс III) у пациентов с менее чем критическим (т.е. > 90%) стенозом нативного сосуда [47].

В одной из самых больших серий публикаций, касающихся использования ЖСА, опубликованных на сегодняшний день, совокупная степень проходимости артерии составила 97,1% через 1 мес, 92,3% через 1 год, 85,5% через 5 лет, 80,9% через 7 лет и 66,5% через 10 лет после операции [48]. Этот относительно низкий уровень проходимости в поздние сроки улучшился благодаря использованию скелетированного трансплантата ЖСА только для шунтирования сосуда со стенозом > 90%. Используя этот подход, Т. Suzuki с соавт. [49] сообщили о 97,8; 94,7 и 90,2% совокупных показателей проходимости в раннем послеоперационном периоде и через 5 и 8 лет после операции соответственно.

В ряде исследований установлено, что использование ЖСА вместо ТПВ для трансплантации ПКА у пациентов с БВГА в левую коронарную систему приводит к значительному увеличению долгосрочной выживаемости [50, 51]. Тем не менее другие исследования не подтвердили этот вывод, и метаанализ рентгеноконтрастных ангиографий, сравнивающий все кондуиты, используемые в коронарной хирургии, показал, что ЖСА связана с самым высоким риском функциональной и полной окклюзии трансплантата [34]. Следует отметить, что в большинстве опубликованных серий сообщается об использовании ЖСА в качестве педикулярного («на ножке»), а не скелетированного трансплантата; было показано, что метод скелетизации при отборе артерии значительно улучшает ее проходимость [49].

МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ И ПАТОФИЗИОЛОГИЧЕСКИЕ ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ДОЛГОСРОЧНУЮ ПРОХОДИМОСТЬ ТРАНСПЛАНТАТА

Конкуренция кровотока – важный фактор, влияющий на артериальную морфологию и проходимость кондуита. String sign – это атрофическое изменение артериального проводника, и это явление происходит из-за конкурентного потока при шунтировании только умеренно стенозированных коронарных артерий (КА). Было показано, что диаметр трансплантата из ВГА уменьшается, если стеноз нативной коронарной артерии меньше критического [52]. В желудочно-сальниковой артерии показатели проходимости,

по-видимому, снижаются за счет именно конкурентного потока. Н. Suma и соавт. [53] установили, что 10-летняя проходимость ЖСА составила 62,5%, и одной из основных причин поздней окклюзии трансплантата явился анастомоз с некротически стенозированной КА. Взаимосвязь между проходимостью ТПВ и стенозом шунтированной КА вызывает споры, однако конкурентный поток может быть незначительным фактором, влияющим на проходимость ТПВ.

Считается, что напряжение сдвига стенки играет важную роль в развитии атеросклероза. Т. Shimizu и соавт. [54] обнаружили, что скорости сдвига ВГА были выше по сравнению с ТПВ, из чего было сделано предположение, что эти различия могут иметь значение для развития дегенеративного заболевания трансплантата и влиять на длительность проходимости кондукта. Действительно, эндотелиальные клетки в ВГА высвобождают больше простацилина [12] и оксида азота [55], чем в ТПВ. Влияние конкуренции потоков на напряжение сдвига в коронарном шунте неизвестно. Большая скорость потока и меньший диаметр сосуда увеличивают напряжение сдвига.

G. Tinica и соавт. [56] провели исследование с целью выявления морфологических и патофизиологических факторов, связанных с длительной проходимостью трансплантатов, используемых при АКШ. Были проанализированы результаты компьютерно-томографической оценки проходимости 340 трансплантатов через $139,78 \pm 36,64$ мес после АКШ у 127 пациентов. Прочность трансплантата варьировала в зависимости от типа сосуда и территории реваскуляризации. Максимальная проходимость была получена для ЛА (80,65%) для области, кровоснабжаемой ПКА, ПВГА (92,86%) – для передне-боковой области и ТПВ (82,54%) – для территории огибающей артерии.

Левая ВГА в качестве шунта к ПНА окклюзировалась в 13 (7,93%) случаях, из них 7 – из-за конкурентного кровотока. Влияние длины трансплантата на показатели проходимости после индексации по высоте было незначительным. Степень стеноза нативного (шунтируемого) сосуда влияла на показатели проходимости артериального трансплантата с отношением шансов (OR) окклюзии 3,02 при анастомозе с сосудами со стенозом < 90%. Диаметр целевого сосуда также влиял на показатели проходимости с OR окклюзии 2,63 для ТПВ [95%-й доверительный интервал (95% CI) 1,32–2,98; $p = 0,0041$] и 2,31 для артериальных трансплантатов [95% CI 1,53–3,19; $p = 0,0001$] при анастомозе с целевыми сосудами с просветом $\leq 1,5$ мм.

Мало изучено значение времени прохождения потока (ВПП) в трансплантатах, анастомозированных

с хронически окклюзированными коронарными сосудами (ХОС). В исследовании Н. Oshimaa и соавт. [57] были установлены пороговые значения ВПП для выявления недостаточности обходных трансплантатов, анастомозированных с ХОС, чтобы прояснить взаимосвязь между ранним отказом трансплантата и степенью коллатерального кровообращения/региональным движением стенки миокарда, кровоснабжаемой ХОС. Мультивариантный регрессионный анализ и анализ рабочих характеристик артерии-реципиента выявили следующие предикторы ранней несостоятельности трансплантата: значение среднего потока (Q_{mean}) < 11,5 мл/мин для артериальных кондуктов, значение индекса пульсации (PI) > 5,85 и акинетическое/дискинетическое движение стенки на территории ХОС для ТПВ.

Таким образом, морфологические параметры, такие как тип трансплантата, область реваскуляризации, диаметр нативного сосуда и степень стеноза, являются важными факторами, обуславливающими долгосрочную проходимость кондукта.

МЕТОДЫ ЛУЧЕВОЙ ДИАГНОСТИКИ В ОЦЕНКЕ СОСТОЯНИЯ КОРОНАРНЫХ ШУНТОВ. РАДИОНУКЛИДНЫЕ МЕТОДЫ И МАГНИТНО-РЕЗОНАНСНАЯ ТОМОГРАФИЯ

Согласно текущим рекомендациям, несмотря на доказательства развития патологии трансплантата, почти у каждого пятого пациента уже в раннем послеоперационном периоде не рекомендуется проводить стресс-тестирования и анатомические диагностические процедуры для оценки проходимости шунтов у бессимптомных пациентов в течение 5 лет после операции АКШ [58]. Кроме того, гемодинамическую значимость стеноза шунта не всегда можно точно определить по данным коронарной ангиографии [59, 60].

Следовательно, важное значение для клинической оценки имеют различные диагностические стратегии (инвазивные или неинвазивные), которые могут дополнительно характеризовать гемодинамические последствия поражения и идентифицировать лиц, подверженных риску смерти и сердечной недостаточности после успешного АКШ. В данной ситуации важную роль могут играть лучевые методы неинвазивной диагностики, в том числе ядерной медицины.

РАДИОНУКЛИДНЫЕ МЕТОДЫ

Известно, что нагрузочная перфузионная сцинтиграфия миокарда (ПСМ) методом однофотонной эмиссионной компьютерной томографии (ОФЭКТ) –

это хорошо зарекомендовавший себя неинвазивный визуализирующий способ оценки коронарного кровотока у пациентов с подозрением на или установленным хроническим коронарным синдромом (ХКС). В дополнение к оценке региональной перфузии миокарда, электрокардиографическая синхронизация позволяет проводить оценку параметров функции левого желудочка (ЛЖ), т.е. фракции выброса и других показателей [61, 62].

Так, в исследовании F. Ortiz и соавт. [63] через 1 год после КШ пациентам проводили нагрузочную (стресс-тестирование с физической нагрузкой) перфузионную ОФЭКТ миокарда для определения прогностических критериев неблагоприятного исхода (сочетание смерти и застойной сердечной недостаточности). Было показано, что три отдельных результата стресс-теста предсказывали появление первичной конечной точки: неспособность достичь третьей стадии протокола Брюса (OR 7,3; 95% CI 2,4–22,1; $p < 0,001$), фракция выброса ЛЖ $< 45\%$ (OR 4,0; 95% CI 1,1–15,3; $p = 0,041$) и средне-большой размер стресс-индуцированного дефекта перфузии (OR 2,31; 95% CI 1,1–1,5; $p = 0,04$). Эти результаты являются дополнительными и наиболее убедительными среди пациентов, прошедших тестирование с физической нагрузкой (HR 10,6; 95% CI 3,6–30,6; $p < 0,001$).

Тяжелая стресс-индуцированная ишемическая дисфункция ЛЖ может быть обнаружена также на ОФЭКТ–ПСМ с помощью неперфузионных маркеров, таких как транзиторная ишемическая дилатация (ТИД) ЛЖ [64]. Последняя считается мощным маркером тяжелого ХКС и предиктором будущих сердечных событий, даже когда перфузия миокарда окажется нормальной [65].

S.S. Gultekin и соавт. [66] обследовали 104 пациента, у которых после недавней коронарной реваскуляризации рецидивировали симптомы ИБС: 62 пациента перенесли чрескожную ангиопластику (75 артерий) и 42 – АКШ (104 артерии). Всем им провели стресс-ОФЭКТ–ПСМ и повторную коронарную ангиографию. Показатели перфузии миокарда и ТИД коррелировали с наличием значительной обструктивной ИБС (стеноз КА $> 70\%$) (рис.). ОФЭКТ–ПСМ выявила индуцибельную ишемию у 38 пациентов (36,5%) и ТИД $> 1,20$ у 49 пациентов (47%). Последующая коронарография (через 22 ± 7 дней после ОФЭКТ) выявила значительную обструкцию КА у 44 пациентов (42%). Чувствительность ОФЭКТ–ПСМ в выявлении обструктивной ИБС составила 61%, но значительно возросла до 93% при добавлении ТИД в качестве диагностического критерия ($p < 0,0001$).

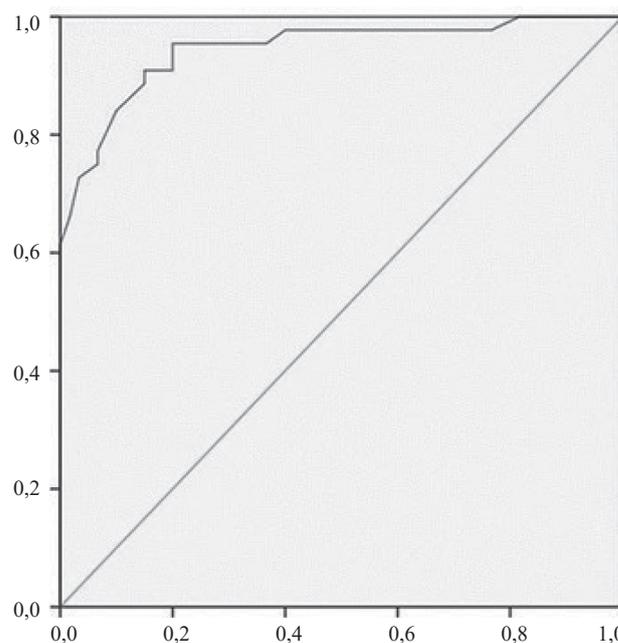


Рисунок. Кривая ROC-анализа отношения объема ЛЖ в состоянии стресса и покоя у пациентов с предшествующей коронарной реваскуляризацией для выявления обструктивной (стеноз $> 70\%$) ИБС [66]

M. Kawasujі и соавт. [67] сравнили пропускную способность трансплантатов ВГА и подкожной вены в условиях физической нагрузки с помощью радионуклидной ангиокардиографии. В соответствии с типом шунтирующего трансплантата к левой ПНА 52 пациента были разделены на две группы: первую группу составили 27 пациентов с трансплантатом ВГА, а вторую – 25 пациентов с ТПВ. Трансплантаты подкожной вены были использованы для шунтирования правой и огибающей КА. При выполнении физической нагрузки перед операцией значения глобальной и региональной фракции выброса в обеих группах снизились одинаково. После операции общая фракция выброса, измеренная в первой и второй группах, значительно увеличилась: с 54 ± 2 до $57 \pm 2\%$ и с 54 ± 1 до $60 \pm 2\%$ соответственно, фракция выброса передне-перегородочной области – с 29 ± 1 до $32 \pm 2\%$ и с 29 ± 1 до $35 \pm 1\%$ соответственно, а фракция апикального выброса возросла с 75 ± 3 до $82 \pm 2\%$ и с 77 ± 2 до $86 \pm 2\%$ соответственно.

Различий в увеличении общей и региональной фракций выброса, вызванном физической нагрузкой, между первой и второй группами не обнаружено. У шести пациентов в первой группе выявлены нарушения движения стенки в передне-перегородочном и (или) апикальном сегментах, вызванные физической нагрузкой. Напротив, у пациентов во второй группе не было гипокинезов стенки

в указанных сегментах миокарда ЛЖ ($p < 0,05$, первая группа vs вторая).

Результаты этого исследования показывают, что трансплантаты ВГА реагируют на повышенную потребность в кровотоке при физической нагрузке практически так же как ТПВ. Тем не менее представляется, что у пациентов с трансплантатом ВГА имеется несколько больший потенциал при недостаточном кровотоке, о чем свидетельствуют данные обследования небольшой группы пациентов с аномалиями движения стенок, вызванными нагрузкой.

Таким образом, методы радионуклидной визуализации позволяют выявить пациентов с риском серьезных сердечно-сосудистых осложнений, включая сердечную недостаточность, для последующей идентификации несостоятельности коронарных шунтов с помощью коронарной ангиографии в различные сроки после АКШ.

МАГНИТНО-РЕЗОНАНСНАЯ ТОМОГРАФИЯ

Магнитно-резонансная томография сердца (СМРТ) является точным диагностическим инструментом для выявления ишемической болезни сердца. Метод предлагает как функциональные исследования, так и характеристики тканей для количественной оценки ишемии и инфаркта миокарда. Многочисленные исследования продемонстрировали высокую диагностическую точность оценки перфузии миокарда с болюсным введением аденозина [68–72] с более высоким пространственным разрешением по сравнению с методами радионуклидной визуализации. Тем не менее только в небольшом числе исследований использовали стресс-СМРТ у пациентов после коронарного шунтирования; при этом они продемонстрировали хорошую чувствительность и специфичность в выявлении значимых ($> 50\%$) стенозов в шунтах и нативных КА [73–75].

В частности, W.L.F. Bedaux и соавт. [75] оценили значение определяемого с помощью СМРТ потока в трансплантате и резерва кровотока для дифференциации значимого стенозирования венозного трансплантата от гемодинамически незначимого. У 21 пациента, которым была показана рентгеноангиография в связи с жалобами на рецидивирующие боли в грудной клетке после АКШ, провели оценку состояния венозных трансплантатов ($n = 40$) методом СМРТ. Была выполнена трехмерная контрастированная МРТ-ангиография с последующим измерением потока в трансплантате в состоянии покоя и во время гиперемии, вызванной фармакологической нагрузкой. Резерв потока рассчитывали, только если скорость потока в покое превышала 20 мл/мин. Ана-

лиз проводился по четырем категориям стенозирования, определенным по рентгеновской ангиографии: окклюзированные трансплантаты ($n = 3$), трансплантаты со стенозом $>50\%$ ($n = 19$), трансплантаты со стенозом $< 50\%$ с нарушенным потоком ($n = 8$) и кондуиты со стенозом $< 50\%$ и нормальным потоком ($n = 10$).

КТ-ангиография показала окклюзию трех трансплантатов из 40. В девяти из 37 трансплантатов базальный кровоток был < 20 мл/мин, и все они демонстрировали значительный стеноз при рентгеновской ангиографии. У трансплантатов с потоком покоя > 20 мл/мин ($n = 28$) резерв потока достоверно различался между трансплантатами без стеноза и трансплантатами со значительным стенозом или с нарушенным потоком ($2,5 \pm 0,7$ против $1,8 \pm 0,9$; $p = 0,04$). Алгоритм, сочетающий базальный объемный поток < 20 мл/мин и резерв потока трансплантата менее 2, имел чувствительность и специфичность 78 и 80% соответственно для выявления трансплантатов со значительным стенозом или с нарушенным кровотоком.

В исследовании L.P. Salm и соавт. [76] было проведено прямое сравнение ОФЭКТ и СМРТ в оценке гемодинамической значимости ангиографически подтвержденных изменений в шунтирующих трансплантатах. У 25 пациентов посредством ангиографии, перфузионной ОФЭКТ и определения резерва скорости коронарного кровотока с помощью СМРТ оценили функцию 57 артериальных и венозных трансплантатов. На основе результатов ангиографии и ОФЭКТ были выделены четыре группы кондуитов: 1) отсутствие значительного стеноза ($< 50\%$), нормальная перфузия; 2) значительный стеноз ($\geq 50\%$), аномальная перфузия; 3) значительный стеноз, нормальная перфузия (отсутствие гемодинамической значимости); 4) отсутствие значительного стеноза, аномальная перфузия (предполагающая микрососудистое заболевание).

Полная оценка была получена для 46 трансплантатов. Однофотонная эмиссионная компьютерная томография и СМРТ дали аналогичную информацию в 37 из 46 трансплантатов (80%), что свидетельствует о хорошей согласованности методов (κ = 0,61; $p < 0,001$). Восемь трансплантатов кровоснабжали участки миокарда с наличием рубцовой ткани. Когда согласованность между ОФЭКТ и СМРТ была ограничена шунтами для кровоснабжения жизнеспособного миокарда, она улучшилась до 84% (κ = 0,68). Сочетание ангиографии с ОФЭКТ классифицировало 14 поражений в первой группе, 23 – во второй, шесть – в третьей и три – в четвертой. Согласованность ОФЭКТ и СМРТ для каждой группы составила 86, 78, 100 и 33% соответственно.

Таким образом, наличие и доступность такого неинвазивного теста, как сердечно-сосудистая магнитно-резонансная томография, позволяющая исключить значительный стеноз трансплантатов и коронарных артерий, может быть полезным инструментом скрининга при последующем наблюдении за пациентами после АКШ.

ДОППЛЕРОГРАФИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ

Как уже было отмечено, более высокая степень проходимости артериальных кондуитов по сравнению с венозными объясняется гистологическими характеристиками, различиями в восприимчивости сосудов к эндогенным агонистам и большей способностью эндотелиальных клеток артерий секретировать эндогенные дилататоры [11, 77, 78]. В то же время существует немного данных, описывающих адаптацию этих трансплантатов к увеличению потребности в кровотоке миокарда, например, во время нагрузки. Сохраненная эндотелиальная функция в артериальных трансплантатах должна способствовать их хорошим гемодинамическим показателям, позволяя им увеличивать свои размеры при усилении кровотока [77, 79]. Хорошо известно, что артериальные трансплантаты *in situ* имеют меньший диаметр и меньшую исходную пропускную способность, чем венозные трансплантаты [80], что может ограничить любое увеличение кровотока. Однако лишь единичные исследования посвящены сравнительной гемодинамической оценке двух типов кондуитов [67, 81, 82].

Метод количественной ангиографии в сочетании с внутрисосудистым доплеровским анализом скорости, предложенный J.W. Doucette и соавт. [83], позволяет провести точное измерение абсолютного кровотока и может быть использован для изучения адаптации сосудов к увеличению потребности миокарда в кислороде. В исследованиях с использованием импульсной доплеровской эхокардиографии сообщалось о значительно более высокой пиковой скорости потока в дистальном трансплантате ВГА по сравнению с дистальным ТПВ [82]. Таким образом, динамика потока, по-видимому, различается в этих двух типах шунтов, но ни в одном сообщении эти различия подробно не рассматривались. Имеется и ряд других неинвазивных доплеровских эхокардиографических оценок коронарных шунтов [84, 85], однако они ограничены исследованием потока либо в проксимальном [84], либо в дистальном участке [85] трансплантата ВГА.

Недавно разработанный внутрисосудистый интродьюсер с доплеровским датчиком (ДВИ) для

анализа фазовой скорости потока в трансплантатах может проходить через стенозирующие поражения КА и использоваться для измерения скоростей потока дистальнее по отношению к стенозу [86, 87]. С помощью этого метода селективная канюляция шунтирующего трансплантата во время катетеризации сердца позволяет регистрировать фазовые скорости потока как в трансплантате, так и в нативной коронарной артерии, дистальнее наложения анастомоза.

O. Gurné и соавт. [88] провели исследование, чтобы оценить *in vivo* механизмы, с помощью которых различные коронарные шунты реагируют во время увеличения потребности в кровотоке, вызванного кардиостимуляцией (ЭКС), индуцирующей тахикардию. Авторы сравнили выделенные «на ножке» и свободные артериальные кондуиты (ЛВГА и нЭГА), а также и венозные трансплантаты в ранний и отдаленный периоды после операции шунтирования. Сорок три шунта (13 ЭГА, 15 ВГА, 15 ТПВ), исследованных в ранние сроки (9 ± 3 дней) после реваскуляризации, сравнивали с 41 трансплантатом (15 ЭГА, 11 ВГА, 15 ТПВ), которые оценивали в отдаленный период после операции (среднее значение 23 мес, диапазон от 6 до 168 мес) с помощью количественной ангиографии и внутрисосудистого доплеровского анализа скорости во время кардиостимуляции предсердий. Контролем служили 17 нормальных КА.

Базовый поток трансплантата имел тенденцию к снижению в поздние сроки после операции по сравнению с ранним периодом (41 ± 16 и 45 ± 21 мл/мин, недостоверно). Кровоток увеличивался во время ЭКС в среднем на $30 \pm 16\%$ сразу после операции, что меньше чем в поздние сроки ($+46 \pm 18\%$, $p < 0,001$) и меньше, чем в нормальных КА ($+54 \pm 27\%$, $p < 0,001$ vs «ранние» шунты; недостоверно vs «поздние» шунты). Разницы между венозными и артериальными трансплантатами не было. Во время кардиостимуляции в ранние сроки после операции на артериальных и венозных трансплантатах не наблюдалось значительной вазодилатации. В поздние сроки после операции значительная вазодилатация выявлялась только в артериальных трансплантатах от $2,41 \pm 0,37$ до $2,53 \pm 0,41$ мм ($+5,1\%$ относительно исходного уровня, $p < 0,001$). В ранние сроки после операции и в венозных трансплантатах в отдаленные сроки увеличение кровотока было полностью связано с увеличением скорости. В более «поздних» артериальных трансплантатах относительный вклад увеличения скорости в увеличение потока во время стимуляции был ниже ($70 \pm 22\%$), чем в венозных трансплантатах ($102 \pm 11\%$, $p < 0,001$) и аналогичен нормальным коронарным артериям ($68 \pm 28\%$).

Авторы пришли к заключению, что как в ранние, так и поздние сроки после операции артериальные и венозные трансплантаты увеличивают свой поток во время ЭКС. Ранние артериальные и венозные трансплантаты увеличивают кровоток только за счет увеличения скорости. В поздние сроки после операции артериальные трансплантаты действуют как физиологические каналы и увеличивают кровоток также как нормальные коронарные артерии, т.е. благодаря увеличению скорости и калибра, опосредованного наличием эндотелиального резерва.

Как уже указывалось выше, диаметр трансплантата из ВГА и ЖСА уменьшается, если стеноз нативной КА меньше критичного [52, 53]. Это явление связывают с конкурентным кровотоком по умеренно стенозированным КА. В исследовании Т. Shimizu и соавт. [54] было проведено сравнение напряжения сдвига как значимого фактора, влияющего на проходимость трансплантата, между артериальным кондуитом и ТПВ после операции КШ. Был обследован 101 пациент с 40 ВГА, 27 ЖСА и 34 ТПВ с помощью ДВИ во время послеоперационной ангиографии. Объем потока трансплантата и напряжение сдвига были рассчитаны на основе данных о скорости и диаметре. Исследуемые трансплантаты классифицированы по степени нативного стеноза коронарных артерий: группа L имела стеноз от 50 до 75%, а группа H – более 75%. Группа H состояла из 25 ВГА, 17 ЖСА и 21 ТПВ, в то время как группа L – из 15 ВГА, 10 ЖСА и 13 ТПВ.

В группе H объем потока трансплантата достоверно не различался между ВГА (34 ± 11 мл/мин), ЖСА (36 ± 16 мл/мин) и ТПВ (41 ± 15 мл/мин), а напряжение сдвига трансплантата достоверно (ВГА vs ЖСА, $p = 0,0001$; ЖСА vs ТПВ, $p = 0,01$) различалось между ВГА ($16,0 \pm 4,8$ Дин/см²), ЖСА ($9,1 \pm 3,2$ Дин/см²) и ТПВ ($4,8 \pm 1,6$ Дин/см²). В группе L объем потока был ниже ($p < 0,001$) в ВГА (18 ± 6 мл/мин) и ЖСА (13 ± 8 мл/мин), чем в ТПВ (35 ± 16 мл/мин), а напряжение сдвига было значительно ($p < 0,001$) больше в ВГА ($13,7 \pm 4,9$ Дин/см²), чем в ЖСА ($5,6 \pm 2,0$ Дин/см²) или ТПВ ($4,6 \pm 2,0$ Дин/см²). По мнению авторов, полученные данные свидетельствуют о том, что превосходящее напряжение сдвига в ВГА сохраняется, несмотря на уменьшение объема потока из-за конкуренции. Более низкое напряжение сдвига ЖСА при промежуточном стенозе может быть связано с развитием несостоятельности кондуита.

Имеются сообщения, согласно которым послеоперационная пропускная способность трансплантатов ВГА к левой ПНА ограничена по сравнению с таковой у ТПВ [67]. Поэтому целью исследования

Т. Akasaka и соавт. [89] явилась оценка динамики кровотока и пропускной способности указанных кондуитов к ПНА с помощью ДВИ.

Фазовые записи скорости потока были получены в средней части шунтирующего трансплантата и в нативной левой ПНА с использованием 0,018-дюймового (0,046 см) 12 МГц доплеровского проводника у 53 пациентов: 27 пациентов с трансплантатом ВГА (16 с «новым» трансплантатом, оцененным через 1 мес после операции, и 11 со «старым», оцененным через 1 год) и 26 пациентов с ТПВ (13 с «новым» трансплантатом, оцененным через 1 мес после операции, и 13 со «старым», оцененным через 1 год). Все пациенты были обследованы в исходном состоянии покоя и во время гиперемии, вызванной внутривенной инфузией дипиридамола в дозе 0,56 мг/кг массы тела в течение 4 мин.

Непосредственно в ПНА систолическая и диастолическая пиковые скорости, средняя по времени мгновенная спектральная пиковая скорость (усредненная по времени пиковая скорость), диаметр сосуда и рассчитанный объем потока существенно не различались между четырьмя группами трансплантатов. Усредненная по времени пиковая скорость была значительно выше для новых, чем для старых артериальных трансплантатов или для новых или старых венозных трансплантатов (27 ± 9 против 19 ± 6 , 11 ± 5 и 12 ± 6 см/с соответственно, $p < 0,01$). Однако поскольку диаметр новых артериальных трансплантатов был значительно меньше, чем у других трех трансплантатов ($2,4 \pm 0,1$ против $2,9 \pm 0,2$ [$p < 0,05$], $3,6 \pm 0,6$ [$p < 0,01$] и $3,4 \pm 0,5$ мм) [$p < 0,01$] соответственно), различия в расчетных объемах потока в состоянии покоя (62 ± 17 против 58 ± 15 , 61 ± 18 и 58 ± 19 мл/мин соответственно, недостоверно) между новыми артериальными трансплантатами и другими трансплантатами обнаружить не удалось.

Хотя максимальная усредненная по времени максимальная скорость во время гиперемии была значительно больше у новых, чем у старых артериальных трансплантатов или новых или старых венозных трансплантатов (47 ± 17 против 40 ± 7 , 31 ± 8 и 34 ± 12 см/с соответственно, $p < 0,01$), запас потока новых артериальных трансплантатов оказался значительно меньше, чем у других трех групп ($1,8 \pm 0,3$ против $2,6 \pm 0,3$, $2,8 \pm 0,5$ и $3,0 \pm 0,6$ соответственно, $p < 0,01$), поскольку исходная усредненная по времени пиковая скорость этих новых трансплантатов была намного выше, чем у других групп.

Таким образом, внутренний поток трансплантата из ВГА в ранние сроки после операции характеризуется более высокой скоростью покоя, чем поток ТПВ. Эта высокая скорость поддерживает объем по-

тока в исходном состоянии в качестве компенсации за меньший диаметр. Хотя резерв кровотока существенно не различается между новыми и старыми венозными трансплантатами, резерв для кондуитов ВГА значительно уменьшается вскоре после операции шунтирования. Эта ограниченная пропускная способность улучшается в позднем послеоперационном периоде благодаря увеличению диаметра и снижению скорости потока по сравнению с исходными уровнями.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рентгеновская ангиография считается стандартной процедурой для оценки проходимости шунтов коронарных артерий, поскольку она обеспечивает отличную визуализацию трансплантата, количественную информацию о степени просвета, наличия обструкции и обеспечивает, таким образом, показания к повторной реваскуляризации. Однако гемодинамическая значимость стеноза не может быть точно определена по коронарной ангиограмме. Поэтому доступность и высокая информативность других методов лучевой диагностики может быть полезным инструментом скрининга на любом этапе наблюдения за пациентами после аортокоронарного шунтирования.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- Centers for disease control and prevention. Prevalence of coronary heart disease – United States, 2006–2010. *MMWR*. 2011;60(40):1377–1381.
- Center for Disease Control and Prevention, National Center for Health Statistics. Underlying Cause of Death 1999–2013 on CDC WONDER Online Database, released 2015. Data are from the Multiple Cause of Death Files, 1999–2013, as compiled from data provided by the 57 vital statistics jurisdictions through the Vital Statistics Cooperative Program.
- Taggart D.P., D’Amico R., Altman D.G. Effect of arterial revascularisation on survival: a systematic review of studies comparing bilateral and single internal mammary arteries. *Lancet*. 2001;358(9285):870–875. DOI: 10.1016/S0140-6736(01)06069-X.
- Shahian D.M., O’Brien S.M., Sheng S., Grover F.L., Mayer J.E., Jacobs J.P. et al. Predictors of long-term survival after coronary artery bypass grafting surgery: results from the Society of Thoracic Surgeons Adult Cardiac Surgery Database (the ASCERT study). *Circulation*. 2012;125(12):1491–1500. DOI: 10.1161/CIRCULATIONAHA.111.066902.
- Wu C., Camacho F.T., Wechsler A.S., Lahey S., Culliford A.T., Jordan D. et al. Risk score for predicting long-term mortality after coronary artery bypass graft surgery. *Circulation*. 2012;125(20):2423–2430. DOI: 10.1161/CIRCULATIONAHA.111.055939.
- Moreyra A.E., Deng Y., Wilson A.C., Cosgrove N.M., Kostis W.J., Kostis J.B. Incidence and trends of heart failure admissions after coronary artery bypass grafting surgery. *European Journal of Heart Failure*. 2013;15(1):46–53. DOI: 10.1093/eurjhf/hfs154.
- Lopes R.D., Mehta R.H., Hafley G.E., Williams J.B., Mack M.J., Peterson E.D. et al. Relationship between vein graft failure and subsequent clinical outcomes after coronary artery bypass surgery. *Circulation*. 2012;125(6):749–756. DOI: 10.1161/CIRCULATIONAHA.111.040311.
- Murad H. Saphenous vein graft stenosis. *Arq. Bras. Cardiol*. 2020;115(3):545–546. DOI: 10.36660/abc.20200633.
- Goldman S., Zadina K., Moritz T., Ovitt Th., Sethi G., Copeland J.G. et al. Long-term patency of saphenous vein and left internal mammary artery grafts after coronary artery bypass surgery: results from a department of veterans affairs cooperative study. *J. Am. Coll. Cardiol*. 2004;44(11):2149–2156. DOI: 10.1016/j.jacc.2004.08.064.
- Loop F.D., Lytle B.W., Cosgrove D.M., Stewart R.W., Goormastic M., Williams G.W. et al. Influence of the internal-mammary-artery graft on 10-year survival and other cardiac events. *N. Engl. J. Med*. 1986;314(1):1–6. DOI: 10.1056/NEJM198601023140101.
- Otsuka F., Yahagi K., Sakakura K., Virmani R. Why is the mammary artery so special and what protects it from atherosclerosis? *Ann. Cardiothorac. Surg*. 2013;2(4):519–526. DOI: 10.3978/j.issn.2225-319X.2013.07.06.
- Bonatti J., Dichtl W., Dworzak E.A., Antretter H., Unger F., Puschendorf B. et al. Stimulated prostacyclin release by conduits used for coronary artery bypass grafting. *Thorac. Cardiovasc. Surg*. 1998 46(2):59–62. DOI: 10.1055/s-2007-1010190.
- Broeders M.A., Doevendans P.A., Maessen J.G., van Gorsel E., Egbrink M.G., Daemen M.J. et al. The human internal thoracic artery releases more nitric oxide in response to vascular endothelial growth factor than the human saphenous vein. *J. Thorac. Cardiovasc. Surg*. 2001;122(2):305–309. DOI: 10.1067/mtc.2001.113602.
- Taggart D.P., Altman D.G., Gray A.M., Lees B., Nugara F., Yu L. et al. Randomized trial to compare bilateral vs. single internal mammary coronary artery bypass grafting: 1-year results of the Arterial Revascularisation Trial (ART). *Eur. Heart J*. 2010;31(20):2470–2481. DOI: 10.1093/eurheartj/ehq318.
- Weiss A.J., Zhao S., Tian D.H., Taggart D.P., Yan T.D. A meta-analysis comparing bilateral internal mammary artery with left internal mammary artery for coronary artery bypass grafting. *Ann. Cardiothorac. Surg*. 2013;2(4):390–400. DOI: 10.3978/j.issn.2225-319X.2013.07.16.
- Yi G., Shine B., Rehman S.M., Altman D.G., Taggart D.P. Effect of bilateral internal mammary artery on long-term survival: a meta-analysis approach. *Circulation*. 2014;130(7):539–545. DOI: 10.1161/CIRCULATIONAHA.113.004255.
- Dai C., Lu Z., Zhu H., Xue S., Lian F. Bilateral internal mammary artery grafting and risk of sternal wound infection: evidence from observational studies. *Ann. Thorac. Surg*. 2013;95(6):1938–1945. DOI: 10.1016/j.athoracsur.2012.12.038.
- Deo S.V., Shah I.K., Dunlay S.M., Erwin P.J., Locker C., Al-tarabsheh S.E. et al. Bilateral internal thoracic artery harvest and deep sternal wound infection in diabetic patients. *Ann. Thorac. Surg*. 2013;95(3):862–869. DOI: 10.1016/j.athoracsur.2012.11.068.

19. Carpentier A., Guermontprez J.L., Deloche A., Frechette C., DuBost C. The aorta-to-coronary radial artery bypass graft: a technique avoiding pathological changes in grafts. *Ann. Thorac. Surg.* 1973;16(2):111–121. DOI: 10.1016/s0003-4975(10)65825-0.
20. Acar C., Jebara V.A., Portoghese M., Beyssen B., Pagny J.Y., Grare P. et al. Revival of the radial artery for coronary artery bypass grafting. *Ann. Thorac. Surg.* 1992;54(4):652–659. DOI: 10.1016/0003-4975(92)91007-v.
21. Gaudino M., Prati F., Caradonna E., Trani C., Burzotta F., Schiavoni G. et al. Implantation in the coronary circulation induces morphofunctional transformation of radial grafts from muscular to elastomuscular. *Circulation.* 2005;112(Suppl.9):1208–1211. DOI: 10.1161/CIRCULATIONAHA.104.512889.
22. Tatoulis J., Buxton B.F., Fuller J.A., Meswani M., Theodore S., Powar N., Wynne R. Longterm patency of 1108 radial arterial-coronary angiograms over 10 years. *Ann. Thorac. Surg.* 2009;88(1):23–29. DOI: 10.1016/j.athoracsur.2009.03.086.
23. Khot U., Friedman D., Petterson G., Smedira N.G., Li J., Ellis S.G. Radial artery bypass grafts have an increased occurrence of angiographically severe stenosis and occlusion compared with left internal mammary arteries and saphenous vein grafts. *Circulation.* 2004;109(17):2086–2091. DOI: 10.1161/01.CIR.0000127570.20508.5C.
24. Deb S., Cohen E.A., Singh S.K., Une D., Laupacis A., Fremes S.E. Radial artery and saphenous vein patency more than 5 years after coronary artery bypass surgery: results from RAPS (Radial Artery Patency Study). *J. Am. Coll. Cardiol.* 2012;60(1):28–35. DOI: 10.1016/j.jacc.2012.03.037.
25. Gaudino M., Alessandrini F., Pragliola C., Cellini C., Glieca F., Luciani N. et al. Effect of target artery location and severity of stenosis on mid-term patency of aorta-anastomosed vs. internal thoracic artery anastomosed radial artery grafts. *Eur. J. Cardiothorac. Surg.* 2004;25(3):424–428. DOI: 10.1016/j.ejcts.2003.11.027.
26. Gaudino M., Crea F., Cammertoni F., Mazza A., Toesca A., Massetti M. Technical issues in the use of the radial artery as a coronary artery bypass conduit. *Ann. Thorac. Surg.* 2014;98(6):2247–2254. DOI: 10.1016/j.athoracsur.2014.07.039.
27. Goldman S., Sethi G.K., Holman W., Thai H., et al. Radial artery grafts vs saphenous vein grafts in coronary artery bypass surgery: a randomized trial. *JAMA.* 2011;305(2):167–174. DOI: 10.1001/jama.2010.1976.
28. Collins P., Webb C.M., Chong C.F., Moat N.E. Radial artery versus saphenous vein patency randomized trial: five year angiographic follow-up. *Circulation.* 2008;117(22):2859–2864. DOI: 10.1161/CIRCULATIONAHA.107.736215.
29. Hayward P.A., Buxton B.F. Mid-term results of the Radial Artery Patency and Clinical Outcomes randomized trial. *Ann. Cardiothorac. Surg.* 2013;2(4):458–466. DOI: 10.3978/j.issn.2225-319X.2013.07.18.
30. Benedetto U., Angeloni E., Refice S., Sinatra R. Radial artery versus saphenous vein graft patency: meta-analysis of randomized controlled trials. *J. Thorac. Cardiovasc. Surg.* 2010;139(1):229–231. DOI: 10.1016/j.jtcvs.2009.05.038.
31. Hu X., Zhao Q. Systematic comparison of the effectiveness of radial artery and saphenous vein or right internal thoracic artery coronary bypass grafts in non-left anterior descending coronary arteries. *J. Zhejiang Univ. Sci. B.* 2011;12(4):273–279. DOI: 10.1631/jzus.B1000241.
32. Cao C., Manganas C., Horton M., Bannon P., Munkholm-Larsen S., Ang Su.C. et al. Angiographic outcomes of radial artery versus saphenous vein in coronary artery bypass graft surgery: a meta-analysis of randomized controlled trials. *J. Thorac. Cardiovasc. Surg.* 2013;146(2):255–261. DOI: 10.1016/j.jtcvs.2012.07.014.
33. Zhang H., Wang Z.W., Wu H.B., Hu X.P., Zhou Z., Xu P. Radial artery graft vs. saphenous vein graft for coronary artery bypass surgery: which conduit offers better efficacy? *Herz.* 2014;39(4):458–465. DOI: 10.1007/s00059-013-3848-5.
34. Benedetto U., Raja S.G., Albanese A., Amrani M., Biondi-Zoccai G., Frati G. Searching for the second best graft for coronary artery bypass surgery: a network meta-analysis of randomized controlled trials. *Eur. J. Cardiothorac. Surg.* 2015;47(1):59–65. DOI: 10.1093/ejcts/ezu111.
35. Tranbaugh R.F., Dimitrova K.R., Lucido D.J., Hoffman D.M., Dincheva G.R., Geller C.M. et al. The second best arterial graft: a propensity analysis of the radial artery versus the free right internal thoracic artery to bypass the circumflex coronary artery. *J. Thorac. Cardiovasc. Surg.* 2014;147(1):133–140. DOI: 10.1016/j.jtcvs.2013.08.040.
36. Hoffmann D.M., Dimitrova K.R., Lucido D.J., Dincheva G.R., Geller C.M., Balam S.K. et al. Optimal conduit for diabetic patients: propensity analysis of radial and right internal thoracic arteries. *Ann. Thorac. Surg.* 2014;98(1):30–36. DOI: 10.1016/j.athoracsur.2014.03.044.
37. Deb S., Singh S.K., Moussa F., Tsubota H., Une D., Kiss A. et al. The long-term impact of diabetes on graft patency after coronary artery bypass grafting surgery: a substudy of the multicenter Radial Artery Patency Study. *J. Thorac. Cardiovasc. Surg.* 2014;148(4):1246–1253. DOI: 10.1016/j.jtcvs.2014.06.057.
38. Gaudino M., Glieca F., Luciani N., Alessandrini F., Possati G. Clinical and angiographic effects of chronic calcium channel blocker therapy continued beyond first postoperative year in patients with radial artery grafts: results of a prospective randomized investigation. *Circulation.* 2001;104(12Suppl.1): 64. DOI: 10.1161/hc37t1.094819.
39. Patel A., Asopa S., Dunning J. Should patients with radial artery conduit have post-operative calcium channel blockers? *Interact. Cardiovasc. Thorac. Surg.* 2006;5(3):251–257. DOI: 10.1510/icvts.2006.129262.
40. Pym J., Brown P.M., Charrette E.J., Parker J.O., West R.O. Gastroepiploic-coronary anastomosis: a viable alternative bypass graft. *J. Thorac. Cardiovasc. Surg.* 1987;94(2):256–259.
41. Suma H., Fukumoto H., Takeuchi A. Coronary artery bypass grafting by utilizing in situ right gastroepiploic artery: basic study and clinical application. *Ann. Thorac. Surg.* 1987;44(4):394–397. DOI: 10.1016/s0003-4975(10)63799-x.
42. Saito T., Suma H., Terada Y., Wanibuchi Y., Fukuda S., Furuta S. Availability of the in situ right gastroepiploic artery for coronary artery bypass. *Ann. Thorac. Surg.* 1992;53(2):266–268. DOI: 10.1016/0003-4975(92)91330-c.
43. Suma H., Takanashi R. Arteriosclerosis of the gastroepiploic and internal thoracic arteries. *Ann. Thorac. Surg.* 1990;50(3):413–416. DOI: 10.1016/0003-4975(90)90485-o.

44. Ochiai M., Ohno M., Taguchi J., Hara K., Suma H., Isshiki T. et al. of human gastroepiploic arteries to vasoactive substances: comparison with responses of internal mammary arteries and saphenous veins. *J. Thorac. Cardiovasc. Surg.* 1992;104(2):453–458.
45. Takayama T., Suma H., Wanibuchi Y., Tohda E., Marsunaka T., Yamashita S. Physiological and pharmacological responses of arterial graft flow after coronary artery bypass grafting measured with an implantable ultrasonic Doppler miniprobe. *Circulation.* 1992;86(Suppl.5):217–223.
46. Suma H., Wanibuchi Y., Furuta S., Takeuchi A. Does use of gastroepiploic artery graft increase surgical risk? *J. Thorac. Cardiovasc. Surg.* 1991;101(1):121–125.
47. Hillis D.L., Smith P.K., Anderson J.L., Bittl J.A. et al. 2011 ACCF/AHA guideline for coronary artery bypass graft surgery: a report of the American College of Cardiology Foundation/American Heart Association Task Force on Practice Guidelines: developed in collaboration with the American Association for Thoracic Surgery, Society of Cardiovascular Anesthesiologists, and Society of Thoracic Surgeons. *J. Am. Coll. Cardiol.* 2011;58(24):e123–210. DOI: 10.1016/j.jacc.2011.08.009.
48. Suma H., Tanabe H., Takahashi A., Horii T., Isomura T., Hirose H. et al. Twenty years experience with the gastroepiploic artery graft for CABG. *Circulation.* 2007;116(Suppl.11):188–191. DOI: 10.1161/CIRCULATIONAHA.106.678813.
49. Suzuki T., Asai T., Nota H., Kuroyanagi S., Kinoshita T., Takashima N. et al. Early and long-term patency of in situ skeletonized gastroepiploic artery after off-pump coronary artery bypass graft surgery. *Ann. Thorac. Surg.* 2013;96(1):90–95. DOI: 10.1016/j.athoracsur.2013.04.018.
50. Glineur D., D'hoore W., Price J., Dorméus S., de Kerchove L., Dion R. et al. Survival benefit of multiple arterial grafting in a 25-year single-institutional experience: the importance of the third arterial graft. *Eur. J. Cardiothorac. Surg.* 2012;42(2):284–290. DOI: 10.1093/ejcts/ezr302.
51. Suzuki T., Asai T., Matsubayashi K., Kambara A., Kinoshita T., Takashima N. et al. In off-pump surgery, skeletonized gastroepiploic artery is superior to saphenous vein in patients with bilateral internal thoracic arterial grafts. *Ann. Thorac. Surg.* 2011;91(4):1159–1164. DOI: 10.1016/j.athoracsur.2010.12.031.
52. Shimizu T., Hirayama T., Suesada H., Ikeda K., Ito S., Ishimaru S. Effect of flow competition on internal thoracic artery graft: postoperative velocimetric and angiographic study. *J. Thorac. Cardiovasc. Surg.* 2000;120(3):459–465. DOI: 10.1067/mtc.2000.108166.
53. Suma H., Isomura T., Horii T., Sato T. Late angiographic result of using the right gastroepiploic artery as a graft. *J. Thorac. Cardiovasc. Surg.* 2000;120(3):496–498. DOI: 10.1067/mtc.2000.108690.
54. Shimizu T., Ito Sh., Kikuchi Y., Misaka M., Hirayama T., Ishimaru Sh. et al. Arterial conduit shear stress following bypass grafting for intermediate coronary artery stenosis: a comparative study with saphenous vein grafts. *European Journal of Cardio-Thoracic Surgery.* 2004;25(4):578–584. DOI: 10.1016/j.ejcts.2003.12.039.
55. Broeders M.A., Doevendans P.A., Maessen J.G., van Gorsel E., Egbrink M.G., Daemen M.J. et al. The human internal thoracic artery releases more nitric oxide in response to vascular endothelial growth factor than the human saphenous vein. *J. Thorac. Cardiovasc. Surg.* 2001;122(2):305–309. DOI: 10.1067/mtc.2001.113602.
56. Tinica G., Chisto R.O., Enache M., Constantin M.M.L., Ciocoiu M., Furnica C. Long-term graft patency after coronary artery bypass grafting: Effects of morphological and pathophysiological factors. *Anatol. J. Cardiol.* 2018;20(5):275–282. DOI: 10.14744/AnatolJCardiol.2018.51447.
57. Oshimaa H., Tokudaa Y., Arakia Y., Ishiib H., Muroharab T., Ozakic Y. et al. Predictors of early graft failure after coronary artery bypass grafting for chronic total occlusion. *Interactive Cardiovasc. and Thoracic Surgery.* 2016;23(1):142–149. DOI: 10.1093/icvts/ivw084.
58. Wolk M.J., Bailey S.R., Doherty J.U., Douglas P.S., Hendel R.C., Kramer C.M. et al. American College of Cardiology Foundation Appropriate Use Criteria Task Force. ACCF/AHA/ASE/ASNC/HFSA/HRS/SCAI/SCCT/SCMR/STS 2013 multimodality appropriate use criteria for the detection and risk assessment of stable ischemic heart disease: a report of the American College of Cardiology Foundation Appropriate Use Criteria Task Force, American Heart Association, American Society of Echocardiography, American Society of Nuclear Cardiology, Heart Failure Society of America, Heart Rhythm Society, Society for Cardiovascular Angiography and Interventions, Society of Cardiovascular Computed Tomography, Society for Cardiovascular Magnetic Resonance, and Society of Thoracic Surgeons. *J. Am. Coll. Cardiol.* 2014;63(4):380–406. DOI: 10.1016/j.jacc.2013.11.009.
59. White C.W., Wright C.B., Doty D.B., Hiratzka L.F., Eastham C.L., Harrison D.G. et al. Does visual interpretation of the coronary arteriogram predict the physiologic importance of a coronary stenosis? *N. Engl. J. Med.* 1984;310(13):819–824. DOI: 10.1056/NEJM198403293101304.
60. Topol E.J., Nissen S.E. Our preoccupation with coronary luminology. The dissociation between clinical and angiographic findings in ischemic heart disease. *Circulation.* 1995;92(8):2333–2342. DOI: 10.1161/01.cir.92.8.2333.
61. Hesse B., Tägil K., Cuocolo A., Anagnostopoulos C., Bardiés M., Bax J. et al. EANM/ESC procedural guidelines for myocardial perfusion imaging in nuclear cardiology. *Eur. J. Nucl. Med. Mol. Imaging.* 2005;32(7):855–897. DOI: 10.1007/s00259-005-1779-y.
62. Strauss H.W., Miller D.D., Wittry M.D., Cerqueira M.D., Garcia E.V., Iskandrian A.S. et al. Procedure guideline for myocardial perfusion imaging 3.3. *J. Nucl. Med. Technol.* 2008;36(3):155–161. DOI: 10.2967/jnmt.108.056465.
63. Ortiz F., Mbai M., Adabag S., Garcia S., Nguyen J., Goldman S. et al. Utility of nuclear stress imaging in predicting long-term outcomes one-year post CABG surgery. *J. Nucl. Cardiol.* 2018;27(6):1970–1978. DOI: 10.1007/s12350-018-01469-y.
64. Xu Y., Arsanjani R., Clond M., Hyun M., Lemley M. Jr., Fish M. et al. Transient ischemic dilation for coronary artery disease in quantitative analysis of same-day sestamibi myocardial perfusion SPECT. *J. Nucl. Cardiol.* 2012;19(3):465–473. DOI: 10.1007/s12350-012-9527-8.
65. Abidov A., Bax J.J., Hayes S.W., Hachamovitch R., Cohen I., Gerlach J. et al. Transient ischemic dilation ratio of

- the left ventricle is a significant predictor of future cardiac events in patients with otherwise normal myocardial perfusion SPECT. *J. Am. Coll. Cardiol.* 2003;42(10):1818–1825. DOI: 10.1016/j.jacc.2003.07.010.
66. Gultekin S.S., Sadic M., Bilgin M., Koca G., Acikel S., Yeter E. et al. The value of transient ischemic dilation for detecting restenosis after coronary artery revascularization. *Journal of Nuclear Cardiology.* 2018;25(2):586–592. DOI: 10.1007/s12350-016-0607-z.
67. Kawasuji M., Tsujiguchi H., Tedoriya T., Taki J., Iwa T. Evaluation of postoperative flow capacity of internal mammary artery. *J. Thorac. Cardiovasc. Surg.* 1990;99(4):696–702.
68. Nandalur K.R., Dwamena B.A., Choudhri A.F., Nandalur M.R., Carlos R.C. Diagnostic performance of stress cardiac magnetic resonance imaging in the detection of coronary artery disease: a meta-analysis. *J. Am. Coll. Cardiol.* 2007;50(14):1343–1353. DOI: 10.1016/j.jacc.2007.06.030
69. Chih S., Macdonald P.S., Feneley M.P., Law M., Graham R.M., McCrohon J.A. Reproducibility of adenosine stress cardiovascular magnetic resonance in multi-vessel symptomatic coronary artery disease. *J. Cardiovasc. Magn. Reson.* 2010;12(1):42. DOI: 10.1186/1532-429X-12-42.
70. De Jong M.C., Genders T.S., van Geuns R.J., Moelker A., Hunink M.G. Diagnostic performance of stress myocardial perfusion imaging for coronary artery disease: a systematic review and meta-analysis. *Eur. Radiol.* 2012;22(9):1881–1895. DOI: 10.1007/s00330-012-2434-1.
71. Kwong R.Y., Ge Y., Steel K., Bingham S., Abdullah S., Fujikura K. et al. Cardiac magnetic resonance stress perfusion imaging for evaluation of patients with chest pain. *J. Am. Coll. Cardiol.* 2019;74(14):1741–1755. DOI: 10.1016/j.jacc.2019.07.074.
72. Van Assen M., Kuijpers D.J., Schwitter J. MRI perfusion in patients with stable chest-pain. *Br. J. Radiol.* 2020;93(1113):20190881. DOI: 10.1259/bjr.20190881.
73. Klein C., Nagel E., Gebker R., Kelle S., Schnackenburg B., Graf K. et al. Magnetic resonance adenosine perfusion imaging in patients after coronary artery bypass graft surgery. *JACC.* 2009;2(4):437–445. DOI: 10.1016/j.jcmg.2008.12.016.
74. Bernhardt P., Spiess J., Levenson B., Pilz G., Hofling B., Hombach V. et al. Combined assessment of myocardial perfusion and late gadolinium enhancement in patients after percutaneous coronary intervention or bypass grafts: a multicenter study of an integrated cardiovascular magnetic resonance protocol. *JACC.* 2009;2(11):1292–1300. DOI: 10.1016/j.jcmg.2009.05.011.
75. Bedaux W.L.F., Hofman M.B.M., Vyt S.L.A., Bronzwaer J.G.F., Visser C.A., van Rossum A.C. Assessment of coronary artery bypass graft disease using cardiovascular magnetic resonance determination of flow reserve. *J. Am. Coll. Cardiol.* 2002;40(10):1848–1855. DOI: 10.1016/s0735-1097(02)02491-9.
76. Salm L.P., Bax J.J., Vliegen H.W., Langerak S.E., Dibbets P., Jukema J.W. et al. Functional significance of stenoses in coronary artery bypass grafts. evaluation by single-photon emission computed tomography perfusion imaging, cardiovascular magnetic resonance, and angiography. *J. Am. Coll. Cardiol.* 2004;44(9):1877–1882. DOI: 10.1016/j.jacc.2004.07.048.
77. Hanet C., Schroeder E., Michel X., Cosyns J., Dion R., Verhelst R. et al. Flow-mediated vasomotor response to tachycardia of the human internal mammary artery and saphenous vein grafts late following bypass surgery. *Circulation.* 1991;84(5Suppl.):268–274.
78. Gurné O., Chenu P., Polidori C., Louagie Y., Buche M., Haxhe J.P. et al. Functional evaluation of internal mammary artery bypass grafts in the early and late postoperative period. *J. Am. Coll. Cardiol.* 1995;25(5):1120–1128. DOI: 10.1016/0735-1097(94)00538-2.
79. Gurné O., Chenu P., Buche M., Jamart J., Louagie Y., Eucher P. et al. Flow-mediated vasodilation during pacing of the free epigastric artery bypass graft early and late postoperatively. *J. Am. Coll. Cardiol.* 1996;27(2):415–420. DOI: 10.1016/0735-1097(95)00453-x.
80. Loop F.D., Thomas J.D. Hypoperfusion after arterial bypass grafting. *Ann. Thorac. Surg.* 1993;56(4):812–813. DOI: 10.1016/0003-4975(93)90337-h.
81. Fujiwara T., Kajiya F., Kanazawa S., Matsuoka S., Wada Y., Hiramatsu O. et al. Comparison of blood-flow velocity waveforms in different coronary artery bypass grafts: sequential saphenous vein grafts and internal mammary artery grafts. *Circulation.* 1988;78(5Pt1):1210–1217. DOI: 10.1161/01.cir.78.5.1210.
82. Fusejima K., Takahara Y., Sudo Y., Murayama H., Masuda Y., Inagaki Y. Comparison of coronary hemodynamics in patients with internal mammary artery and saphenous vein coronary artery bypass grafts: a noninvasive approach using combined two-dimensional and Doppler echocardiography. *J. Am. Coll. Cardiol.* 1990;15(1):131–139. DOI: 10.1016/0735-1097(90)90188-u.
83. Doucette J.W., Corl D., Payne H., Flynn A.E., Goto M., Nassi M. et al. Validation of a Doppler guidewire for intravascular measurement of coronary artery flow velocity. *Circulation.* 1992;85(5):1899–1911. DOI: 10.1161/01.cir.85.5.1899.
84. De Bono D.P., Samani N.J., Spyt T.J., Hartshorne T., Thrush A.J., Evans D.H. Transcutaneous ultrasound measurement of blood-flow in internal mammary artery to coronary artery grafts. *Lancet.* 1992;339(8790):379–381. DOI: 10.1016/0140-6736(92)90076-f.
85. Takayama T., Suma H., Wanibuchi Y., Tohda E., Matsunaka T., Yamashita S. Physiological and pharmacological responses of arterial graft flow after coronary artery bypass grafting measured with an implantable ultrasonic Doppler miniprobe. *Circulation.* 1992;86(5Suppl.):217–223.
86. Ofili E., Kern M.J., Tatinei S., Deligonul U., Aguirre F., Serota H. et al. Detection of coronary collateral flow by a Doppler-tipped guide wire during coronary angioplasty. *Am. Heart J.* 1991;122(1Pt):221–225. DOI: 10.1016/0002-8703(91)90780-l.
87. Segal J., Kern M.J., Scott N.A., King S.B. 3rd, Doucette J.W., Heuser R.R. et al. Alterations of phasic coronary artery flow velocity in humans during percutaneous coronary angioplasty. *J. Am. Coll. Cardiol.* 1992;20(2):276–286. DOI: 10.1016/0735-1097(92)90091-z.
88. Gurné O., Chenu P., Buche M., Louagie Y., Eucher P., Marchandise B. et al. Adaptive mechanisms of arterial and venous coronary bypass grafts to an increase in flow demand. *Heart.* 1999;82(3):336–342. DOI: 10.1136/hrt.82.3.336.

89. Akasaka T., Yoshikawa J., Yoshida K., Maeda K., Hozumi T., Nasu M. et al. Flow capacity of internal mammary artery grafts: early restriction and later improvement assessed by

doppler guide wire. Comparison with saphenous vein grafts. *J. Am. Coll. Cardiol.* 1995;25(3):640–47. DOI: 10.1016/0735-1097(94)00448-Y.

Информация об авторах

Веснина Жанета Владимировна – д-р мед. наук, зав. лабораторией радионуклидных методов исследования, НИИ кардиологии, Томский НИМЦ, г. Томск, zhvesnina@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9238-6814>

Гракова Елена Викторовна – д-р мед. наук, вед. науч. сотрудник, отделение патологии миокарда, НИИ кардиологии, Томский НИМЦ, г. Томск, gev@cardio-tomsk.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4019-3735>

(✉) **Веснина Жанета Владимировна**, zhvesnina@mail.ru

Поступила в редакцию 11.10.2021;
одобрена после рецензирования 29.12.2021;
принята к публикации 20.01.2022