

Динамическая однофотонная эмиссионная компьютерная томография миокарда как метод идентификации многососудистого поражения коронарного русла

А.В. Мочула¹, аспирант;

К.В. Завадовский^{1,2}, д. м. н., вед. науч. сотр.;

С.Л. Андреев¹, к. м. н., ст. науч. сотр.;

Ю.Б. Лишманов^{1,2}, д. м. н., профессор, чл.-корр. РАН, руководитель научного направления НИИ кардиологии

¹ Научно-исследовательский институт кардиологии ФГБНУ «Томский национальный исследовательский медицинский центр Российской академии наук»,
ул. Киевская, 111а, Томск, 634012, Российская Федерация;

² ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»,
пр-т Ленина, 30, Томск, 634050, Российская Федерация

Dynamic single-photon emission computed tomography as a method of identification of multivessel coronary artery disease

A.V. Mochula¹, Postgraduate;

K.V. Zavadovsky^{1,2}, MD, PhD, DSc, Leading Researcher;

S.L. Andreev¹, MD, PhD, Senior Researcher;

Yu.B. Lishmanov^{1,2}, MD, PhD, DSc, Professor, Corresponding Member
of Russian Academy of Sciences, Head of the Scientific Direction

¹ Cardiology Research Institute of Tomsk National Research Medical Center, Russian Academy of Sciences,
ul. Kievskaya, 111a, Tomsk, 634012, Russian Federation;

² National Research Tomsk Polytechnic University,
prospekt Lenina, 30, Tomsk, 634050, Russian Federation

Цель исследования – определить информативность динамической томосцинтиграфии миокарда в идентификации многососудистого поражения коронарных артерий.

Материал и методы. В покое и на фоне фармакологического стресс-теста 16 пациентам с многососудистым поражением коронарных артерий и 9 здоровым добровольцам была проведена динамическая однофотонная эмиссионная компьютерная томография сердца с ^{99m}Tc-МИБИ. В процессе обработки полученных результатов формировали зоны интереса с полостями и стенок миокарда левого желудочка, на основании которых строили кривые «активность–время». Индекс резерва миокардиального кровотока определялся как частное двух отношений среднего значения счета импульсов с области миокарда к площади под пиком кривой с полости ЛЖ для исследования на фоне фармакологического стресс-теста и в условиях покоя.

Результаты. Среднее значение индекса резерва миокардиального кровотока в группе здоровых добровольцев составило 1,86 (1,59; 2,2), у пациентов с многососудистым поражением коронарных артерий – 1,39 (1,12; 1,69). При значении указанного индекса менее 1,77 рассмотренная методика позволяет идентифицировать многососудистое поражение с чувствительностью и специфичностью 81,8 и 66,7% соответственно.

Заключение. Выполнение стандартной перфузионной сцинтиграфии миокарда в сочетании с методикой оценки индекса резерва миокардиального кровотока позволит повысить диагностическую значимость сцинтиграфического подхода в оценке нарушений коронарного русла при многососудистом поражении коронарных артерий.

Ключевые слова: индекс резерва миокардиального кровотока; однофотонная эмиссионная компьютерная томография; ишемическая болезнь сердца; многососудистое поражение коронарных артерий.

Objective. The aim of this study was to determine the informative value of dynamic tomoscintigraphy in detection of multivessel coronary artery disease (CAD).

Material and methods. Patients with multivessel CAD ($n = 16$) and healthy volunteers ($n = 9$) underwent dynamic cardiac single photon emission computed tomography with ^{99m}Tc-MIBI at rest and during pharmacological stress-test.

Processing of acquired results involved the formation of regions of interest from the cavity and the myocardium of the left ventricle used to create activity-time curves. Coronary flow reserve index was defined as a quotient of two ratios of the mean counts from the myocardial region to the integral activity in the left ventricular cavity for the studies performed during pharmacological stress test and at rest.

Results. The mean values of coronary flow reserve index were 1.86 (1.59; 2.2) in group of healthy volunteers and 1.39 (1.12; 1.69) in patients with multivessel CAD. When the value of this index was less than 1.77, the method allowed for detection of three-vessel CAD with the sensitivity and specificity rates of 81.8% and 66.7%, respectively.

Conclusion. Performing the standard myocardial perfusion scintigraphy in combination with the method of coronary flow reserve index assessment allows for enhancement of the diagnostic value of scintigraphic approach in the evaluation of coronary circulation disturbances in multivessel CAD.

Index terms: coronary flow reserve index; single-photon emission computed tomography; coronary artery disease; multivessel coronary artery disease.

For citation: Mochula A.V., Zavadovsky K.V., Andreev S.L., Lishmanov Yu.B. Dynamic single-photon emission computed tomography as a method of identification of multivessel coronary artery disease. *Vestnik Rentgenologii i Radiologii (Russian Journal of*

Для цитирования: Мочула А.В., Завадовский К.В., Андреев С.Л., Лишманов Ю.Б. Динамическая однофотонная эмиссионная компьютерная томография миокарда как метод идентификации многососудистого поражения коронарного русла. *Вестник рентгенологии и радиологии*. 2016; 97 (5): 289–95. DOI: 10.20862/0042-4676-2016-97-5-289-295

Для корреспонденции: Мочула Андрей Викторович; E-mail: mochula.andrew@gmail.com

Radiology). 2016; 97 (5): 289–95 (in Russ.). DOI: 10.20862/0042-4676-2016-97-5-289-295

For correspondence: Andrey V. Mochula; E-mail: mochula.andrew@gmail.com

Information about authors:

Mochula A.V., <http://orcid.org/0000-0003-0883-466X>

Zavadovsky K.V., <http://orcid.org/0000-0002-1513-8614>

Andreev S.L., <http://orcid.org/0000-0003-4049-8715>

Lishmanov Yu.B., <http://orcid.org/0000-0001-7324-504X>

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Acknowledgements. The study was supported by Grant of the Russian Science Foundation (№15-15-10016).

Received 22 April 2016

Accepted 13 May 2016

Введение

Ишемическая болезнь сердца (ИБС) в настоящее время уверенно занимает ведущее место в структуре причин инвалидизации и смертности от сердечно-сосудистых заболеваний. По оценкам ВОЗ, в 2012 г. от данной патологии в мире погибли 7,4 млн человек.

Эффективным методом лечения этой патологии на сегодняшний день считается процедура реваскуляризации. Под этим термином понимают восстановление коронарного кровотока, которое осуществляется путем проведения аортокоронарного шунтирования или установки стентов в артерии сердца [1]. Так, согласно рекомендациям Европейского общества кардиологов, стенозирование сосуда на 50–90% требует проведения хирургического восстановления кровотока только при доказанной ишемии, которую объективно подтверждают путем определения фракционного коронарного резерва. При этом стеноз считается гемодинамически значимым при значении вышеуказанного показателя 0,8 и менее [1]. Инвазивный характер процедуры, а также высокая стоимость необходимых расходных материалов не позволяют широко использовать данный подход в клинической практике. «Золотым стандартом» неинвазивной оценки миокардиального резерва считается позитронная эмиссионная томография (ПЭТ) с меченой кислородом-15 водой ($[^{15}\text{O}]\text{H}_2\text{O}$) [2, 3]. Однако указанный метод

требует наличия в клинике, где проводят исследования, циклотрона и дорогостоящего диагностического оборудования. Все это наряду с коротким периодом полураспада кислорода-15 (122,2 с) также существенно ограничивает широкое распространение данного метода в повседневной клинической практике.

В рекомендациях Европейского общества кардиологов по реваскуляризации миокарда большую роль в диагностике ишемии миокарда отводят однофотонной эмиссионной компьютерной томографии (ОФЭКТ), чувствительность и специфичность которой составляют 90–91 и 75–84% соответственно [4]. Необходимо отметить, что при выполнении ОФЭКТ пациентам с гемодинамически значимым многососудистым поражением коронарных артерий (КА) довольно часто встречаются ложноотрицательные результаты, то есть отсутствие выраженных стресс-индуцированных дефектов перфузии. В литературе это явление обозначают термином «сбалансированная ишемия», при которой наблюдается равномерное снижение накопления индикатора во всем миокарде левого желудочка [5, 6]. Одним из путей диагностики сбалансированной ишемии миокарда при многососудистом поражении является оценка резерва миокардиального кровотока [7, 8].

В связи с вышеизложенным поиск новых методов определения данного показателя явля-

ется актуальной задачей кардиологии.

До настоящего времени большинство сцинтиграфических работ по данному направлению были выполнены на гамма-камерах с детекторами на основе йодида натрия, которые не позволяют получать динамические данные в томографическом режиме [2, 8]. Появление однофотонных эмиссионных томографов с детекторами на основе кадмий-цинк-теллура дает возможность преодолеть это техническое ограничение, что открывает новые возможности для радионуклидного определения резерва миокардиального кровотока [9–14].

Целью настоящей работы является определение информативности динамической томосцинтиграфии миокарда в идентификации многососудистого поражения коронарных артерий.

Материал и методы

Характеристика пациентов. На базе НИИ кардиологии (г. Томск) были обследованы 16 больных ИБС (возраст 67 ± 5 лет; 13 мужчин, 3 женщины) с диагностированным по результатам инвазивной коронарографии многососудистым поражением коронарных артерий. Критериями включения в группу с многососудистым поражением КА являлись: 1) стенокардия напряжения II–IV функционального класса (по Канадской классификации); 2) наличие по данным инвазивной коронароангиографии (КАГ) стенозов $\geq 50\%$ в бас-

сейнах двух и более коронарных артерий. Критериями исключения были: 1) сахарный диабет I и II типов; 2) наличие постинфарктных аневризм ЛЖ; 3) острый коронарный синдром; 4) нестабильная стенокардия; 5) желудочковые нарушения ритма сердца высоких градаций (по B. Lown); 6) наличие атриовентрикулярных блокад II и III степеней.

Группу сравнения составили 9 здоровых добровольцев (возраст 25 ± 4 ; 7 мужчин, 2 женщины) без наличия факторов риска сердечной патологии и с низкой клинической вероятностью ИБС (<15%) [4].

Инвазивная коронароангиография. Для оценки степени атеросклеротического поражения коронарного русла всем пациентам с ИБС по стандартной методике [15] выполнена инвазивная КАГ с использованием установки Axiom Artis Interventional Lab фирмы Siemens.

Сцинтиграфические исследования. Процедура оценки миокардиального резерва была одобрена этическим комитетом НИИ кардиологии. Все пациенты письменно проинформированы о цели и возможных рисках исследования и дали согласие на его проведение.

Все сцинтиграфические исследования были выполнены на гамма-камере Discovery NM/CT

570с (GE Healthcare). Изображения записаны с использованием низкоэнергетического мультиплекс-коллиматора в 19 проекций на матрицу 32×32 пикселя (размер пикселя 4 мм). Центр энергетического окна установлен на фотопик ^{99m}Tc – 140 кЭв; энергетическое окно было симметричным, его ширина составила 20%.

Подготовка к исследованию. За 12 ч до проведения динамической ОФЭКТ сердца и перфузионной сцинтиграфии миокарда пациентам рекомендовали исключить употребление содержащих кофеин напитков и/или медикаментов. Не менее чем за 2 ч до процедуры пациенты воздерживались от приема пищи. Непосредственно перед началом исследования в локтевую вену обследуемого устанавливали внутривенный периферический катетер.

Перфузионная сцинтиграфия миокарда. В качестве радиофармпрепарата (РФП) для перфузионной сцинтиграфии миокарда использовали ^{99m}Tc -МИБИ (Технетрил, ООО «Диамед») в дозе 900 МБк для исследования на фоне нагрузки (фармакологический стресс-тест с аденозинтрифосфатом) и 200 МБк – в условиях функционального покоя [6, 16, 17]. Запись сцинтиграфического изображения была

выполнена без ЭКГ-синхронизации через 90 мин после инъекции РФП. Продолжительность записи составила 10 мин.

Нативные данные, полученные в ходе исследования миокардиальной перфузии, были обработаны в специализированной программе Corridor 4DM (University of Michigan, Ann Arbor, MI, USA) с использованием срезов по короткой и длинной осям сердца, а также 17-сегментарной полярной карты левого желудочка, нормализованной к пикселю с максимальным счетом импульсов, который принимают за 100% аккумуляции РФП в миокарде левого желудочка [6, 16]. Нарушения миокардиальной перфузии на пике фармакологического стресс-теста и в покое оценивали по общепринятой методике [6, 15] в баллах. При этом значение менее 4 баллов расценивали как норму, 4–8 баллов – как легкое, 9–13 баллов – как умеренное, более 13 баллов – как тяжелое нарушение миокардиальной перфузии.

Методика оценки резерва миокардиального кровотока. Для определения резерва миокардиального кровотока всем пациентам была выполнена динамическая ОФЭКТ миокарда с ^{99m}Tc -технетрилом в состоянии функционального покоя и на фоне фармакологического стресс-теста [7] (рис. 1).

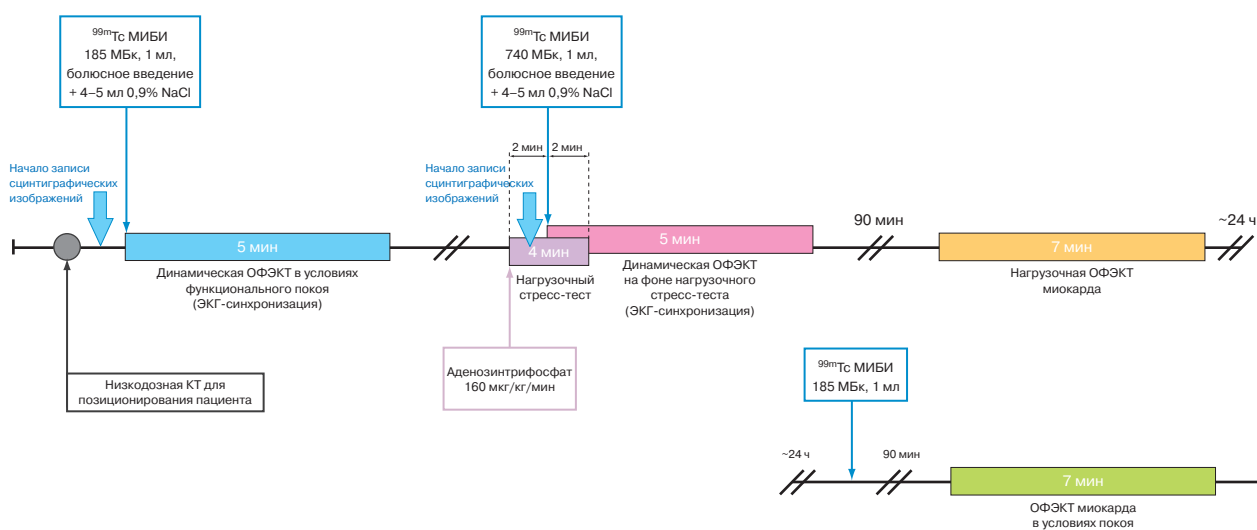


Рис. 1. Схема проведения сцинтиграфического исследования

Позиционирование области сердца пациента относительно центра поля зрения гамма-камеры осуществляли на основании индивидуальных топографо-анатомических данных, полученных при проведении низкодозной (100 кЭв; 200 мАс) компьютерной томографии органов грудной клетки.

Сцинтиграфическую оценку резерва миокардиального кровотока выполняли в два этапа. На первом этапе, в состоянии функционального покоя, проводили запись прохождения болюса РФП по камерам и миокарду ЛЖ. Для этого через внутривенный периферический катетер болюсно вводили ^{99m}Tc -технетрил в объеме 1 мл и дозе 185 МБк. Сбор данных начинали непосредственно в момент введения РФП. Регистрацию динамических томосцинтиграмм проводили в режиме «List Mode», который позволяет ретроспективно реконструировать серии динамических и статических томосцинтиграмм из массива первичных данных [13].

Непосредственно после окончания сбора данных начинали второй этап исследования, на котором выполняли запись прохождения болюса РФП по камерам сердца и миокарду ЛЖ на фоне фармакологического теста. Объем болюса РФП составлял 1 мл, дозовая активность – 715 МБк. Четырехкратное увеличение дозы введения индикатора на втором этапе исследования было необходимо для нивелирования радиоактивности кровяного пула после предыдущего исследования.

Время сбора данных на каждом этапе исследования составило 360 с, что было достаточным для регистрации прохождения радиоактивного индикатора по камерам сердца и накопления его в миокарде ЛЖ [9, 13, 17].

Фармакологический стресс-тест. Всем пациентам была выполнена фармакологическая проба с аденозинтрифосфатом (АТФ), который вводили внутривенно

в дозе 160 мг/кг/мин в течение 4 мин. Внутривенную инъекцию РФП выполняли в конце 2-й минуты инфузии фармацевтического стресс-агента [18], после чего продолжали введение АТФ еще 2 мин. Выполнение фармакологического стресс-теста не сопровождалось появлением атрио-вентрикулярных блокад, депрессий сегмента ST и другими негативными событиями.

Обработка результатов исследования. При помощи специализированного программного обеспечения (GE Alcyone: Dynamic Analysis Tool) из массива первичных данных формировали две серии аксиальных изображений: 1) группа из 64 динамических томосцинтиграмм (длительность кадра 2,2 с), отражающих прохождение болюса РФП по полости и миокарду ЛЖ с 1-й по 150-ю секунду исследования; 2) серия статических томосцинтиграмм, отображающих накопление РФП в стенках ЛЖ.

Следующий этап обработки данных включал анализ статических и динамических изображений, с построением на их основе графиков «активность–время» для зон интереса, соответствующих полости и стенкам (передней, задней, боковой, перегородке и верхушке) ЛЖ.

На основе полученных графиков определяли среднее значение счета импульсов с каждой зоны интереса миокарда, а также интегральную активность РФП в полости ЛЖ. Данные расчеты производили дважды – для исследований в условиях функционального покоя и на фоне фармакологического стресс-теста. Индекс резерва миокардиального кровотока (иРМК) определяли следующим образом:

$$\text{иРМК} = (\text{Cs/Ss})/(\text{Cr/Sr}),$$

где Cs – среднее значение счета импульсов с области миокарда ЛЖ при проведении фармакологического стресс-теста; Ss – интегральная активность РФП в полости ЛЖ, зафиксированная при

проведении фармакологического стресс-теста; Cr – среднее значение счета импульсов с области миокарда ЛЖ в условиях функционального покоя; Sr – интегральная активность РФП в полости ЛЖ, зафиксированная в условиях функционального покоя.

Указанный индекс рассчитывали для левого желудочка в целом, а также для каждого региона (передняя, боковая, перегородочная стенка и верхушка) в отдельности.

Статистический анализ. Статистическую обработку результатов выполняли при помощи программ SPSS 18.0 и MedCalc 12.1.14.0. Полученные данные не подчинялись закону нормального распределения (по критерию Колмогорова–Смирнова), в связи с чем представлены в виде медианы и квартилей Me (Q_{25} ; Q_{75}). Достоверность межгрупповых различий оценивали в соответствии с непараметрическим критерием Mann–Whitney. Для нахождения дифференциальной границы (Cut-off Value) между исследуемыми величинами в независимых выборках проводили ROC-анализ с построением ROC-кривых. Статистически значимыми различия считались при $p < 0,05$.

Результаты

По результатам выполненной КАГ у пациентов с многососудистым поражением коронарных артерий медианные значения степени сужений коронарных артерий составили: ствол левой коронарной артерии – 65 (50; 70)%, передняя нисходящая артерия – 75 (50; 75)%, огибающая артерия – 70 (30; 75)%, правая коронарная артерия – 75 (50; 75)%, что свидетельствует о выраженных атеросклеротических изменениях коронарного русла.

По данным перфузионной сцинтиграфии миокарда, медианное значение размера дефекта перфузии на фоне фармакологического стресс-теста у пациентов с многососудистым поражением

Региональные значения индекса резерва миокардиального кровотока

Регион ЛЖ	Региональные значения иРМК, Ме (Q_{25} ; Q_{75})		
	Группа пациентов с многососудистым поражением КА	Группа здоровых добровольцев	<i>p</i>
Верхушка	1,3 (1,0; 1,76)	1,83 (1,65; 2,04)	0,03
Боковая стенка	1,54 (1,12; 1,73)	2,13 (1,42; 2,31)	0,01
Передняя стенка	1,27 (1,0; 1,7)	1,65 (1,19; 1,98)	0,02
Перегородка	1,25 (0,93; 1,77)	2,1 (1,76; 2,2)	0,01

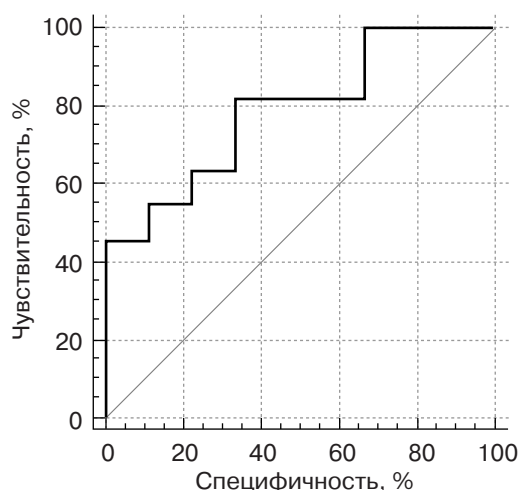


Рис. 2. ROC-кривая, отражающая диагностические возможности индекса резерва миокардиального кровотока в определении многососудистого поражения коронарных артерий

было статистически значимо большим по сравнению с таковым в группе здоровых добровольцев – 6 (2; 11) и 2 (0; 4) балла соответственно.

Необходимо отметить, что, согласно общепринятым рекомендациям, медианное значение данного показателя в группе пациентов с многососудистым поражением следует интерпретировать как выраженное в легкой степени [5]. Столь малый размер дефекта перфузии у таких пациентов можно объяснить феноменом сбалансированной ишемии [5, 6], для которой характерно равномерное снижение аккумуляции перфузионного агента в бассейнах всех коронарных артерий.

Медианное значение индекса резерва миокардиального кровотока левого желудочка у пациентов с многососудистым поражением коронарных артерий по сравнению с группой здоровых добровольцев было достоверно более низким – 1,39 (1,12; 1,69) и 1,86 (1,59; 2,2) соответственно.

Статистически значимое снижение иРМК в группе пациентов

с многососудистым поражением по сравнению с лицами без коронарного атеросклероза было выявлено и при анализе значений данного показателя по отдельным регионам ЛЖ (см. таблицу).

Для определения чувствительности и специфичности полученного индекса резерва миокардиального кровотока в идентификации многососудистого поражения коронарных артерий был проведен ROC-анализ. По его результатам было показано, что значение иРМК, равное 1,77, позволяет сделать вывод о наличии у пациента многососудистого поражения коронарного русла с чувствительностью 81,8% и специфичностью 66,7%. При этом площадь под ROC-кривой (Area Under Curve) составила 0,79 ($p < 0,05$), что свидетельствует о высокой достоверности данного метода (рис. 2).

Обсуждение

В настоящем исследовании впервые были определены чувствительность и специфичность нагрузочной динамической ОФЭКТ

сердца с индексом резерва миокардиального кровотока в диагностике многососудистого поражения коронарных артерий, которые составили 81,8 и 66,7% соответственно. Полученные результаты уступают значениям операционных характеристик ПЭТ с меченной кислородом-15 водой (чувствительность 95%, специфичность 100%) [2, 3]. Связано это с прямой зависимостью фракции экстракции [^{15}O]H₂O от скорости миокардиального кровотока, а также более высокой разрешающей способностью сканеров для ПЭТ. Однако число клинических центров, в которых существует возможность определения миокардиального резерва кровотока с использованием ПЭТ, как в России, так и в Европе, крайне мало [19].

Поиск более простого и менее дорогостоящего метода оценки резерва миокардиального кровотока на сегодняшний день считается одним из основных направлений современной кардиологии. В настоящее время в литературе появляются единичные работы, посвященные использованию динамической ОФЭКТ миокарда для оценки резерва миокардиального кровотока у пациентов с одно-, двух- и трехсосудистым поражением коронарных артерий [8, 9]. При этом до настоящего времени не определены значения чувствительности и специфичности данного показателя в идентификации атеросклеротического поражения КА. Необходимо отметить, что значения иРМК, полученные в представленной нами работе, были сопоставимы с результатами других исследовательских групп [3, 9, 10], что свидетельствует о корректности нашей интерпретации результатов динамической ОФЭКТ.

Что касается ограничений данного исследования, стоит отметить, что мы проводили сопоставление показателя резерва миокардиального кровотока с анатомическим референтным методом – инвазивной КАГ. В то же время

известно, что даже при выраженном анатомическом поражении коронарного русла значения резерва миокардиального кровотока по данным фракционного коронарного резерва могут находиться в пределах нормы [20].

Кроме того, на сегодняшний день распространенность ОФЭКТ-систем с кадмий-цинк-теллуровыми детекторами в России невелика. Подобные аппараты успешно функционируют лишь в НИИ кардиологии г. Томска и ННИИПК им. акад. Е.Н. Мешалкина (г. Новосибирск). Такая ситуация обусловлена как высокой стоимостью данного оборудования, так и относительно недавним выходом технологии на рынок.

В то же время есть основания полагать, что в ближайшее время оборудование такого уровня будет более широко внедряться в медицинских центрах нашей страны [22].

Заключение

Значение индекса резерва миокардиального кровотока менее 1,77, полученное при выполнении динамической ОФЭКТ сердца, позволяет идентифицировать многососудистое поражение коронарных артерий с чувствительностью и специфичностью 81,8 и 66,7% соответственно. Выполнение стандартной перфузионной сцинтиграфии миокарда в сочетании с методикой оценки иРМК позволяет повысить диагностическую значимость сцинтиграфического подхода в оценке нарушений миокардиального кровотока при многососудистом поражении коронарных артерий.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование

Данная работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда (№ 15-15-10016).

Литература / References

- Windecker S., Kolh P., Alfonso F. et al. 2014 ESC/EACTS Guidelines on myocardial revascularization: the task force on myocardial revascularization of the European Society of Cardiology (ESC) and the European Association for Cardio-Thoracic Surgery (EACTS) Developed with the special contribution of the European Association of Percutaneous Cardiovascular Interventions (EAPCI). *Eur. Heart J.* 2014; 37: 2541–619.
- Ito Y., Katoh C., Noriyasu K. et al. Estimation of myocardial blood flow reserve by 99mTc-sestamibi imaging: comparison with the results of [^{15}O] H_2O PET. *Eur. J. Nucl. Med. Mol. Imag.* 2003; 2: 281–7.
- Tsukamoto T., Ito Y., Noriyasu K. et al. Quantitative assessment of regional myocardial flow reserve using Tc-99m-sestamibi imaging comparison with results of O-15 water PET. *Circ. J.* 2005; 2: 188–93.
- Fihn S.D., Blankenship J.C., Alexander K.P. et al. 2014 ACC/AHA/AATS/PCNA/SCAI/STS Focused Update of the Guideline for the diagnosis and management of patients with stable ischemic heart disease. *Circulation.* 2014; 130: 1749–67.
- IAEA. Nuclear cardiology: Guidance and Recommendations for Implementation in Developing Countries. International Atomic Energy Agency. Vienna; 2012.
- Лишманов Ю.Б., Чернов В.И. (ред.) Национальное руководство по радионуклидной диагностике. Томск: STT; 2010; 2. [Lishmanov Yu.B., Chernov V.I. (eds) National guide on radionuclide diagnostics. Tomsk: STT; 2010; 2 (in Russ.).]
- Мочула А.В., Завадовский К.В., Лишманов Ю.Б. Методика определения резерва миокардиального кровотока с использованием нагрузочной динамической однофотонной эмиссионной компьютерной томографии. *Бюллетень экспериментальной биологии и медицины.* 2015; 12: 845–8. [Mochula A.V., Zavadovskiy K.V., Lishmanov Yu.B. Myocardial blood reserve assessment by dynamic stress single-photon emission computed tomography. *Byulleten' Eksperimental'noy Biologii i Meditsiny (Bulletin of Experimental Biology and Medicine, Russian journal).* 2015; 12: 845–8 (in Russ.).]
- Vrublevsky A.V., Boshchenko A.A., Karpov R.S. Simultaneous transeophageal doppler assessment of coronary flow reserve in the left anterior descending artery and coronary sinus allows differentiation between proximal and non-proximal left anterior descending artery stenosis. *Eur. Heart J. Cardiovasc. Imag.* 2004; 1: 25–33.
- Larock M.P., Braat S.H., Sochor H. et al. New developments in myocardial imaging technetium 99mTc SESTAMIBI. London; 1993.
- Ben-Haim S., Murthy V.L., Breault C. et al. Quantification of myocardial perfusion reserve using dynamic SPECT imaging in humans: a feasibility study. *J. Nucl. Med.* 2013; 6: 873–9.
- Hsu B., Chen F.C., Wu T.C. et al. Quantitation of myocardial blood flow and myocardial flow reserve with 99mTc-sestamibi dynamic SPECT/CT to enhance detection of coronary artery disease. *Eur. J. Nucl. Med. Mol. Imag.* 2014; 12: 2294–306.
- Liu C., Sinusas A.J. Is assessment of absolute myocardial perfusion with SPECT ready for prime time? *J. Nucl. Med.* 2014; 10: 1573–5.
- Palyo R., Sinusas A., Liu Y.H. High-sensitivity and high-resolution SPECT/CT systems provide substantial dose reduction without compromising quantitative precision for assessment of myocardial perfusion or function. *J. Nucl. Med.* 2016; 51: 147–8.
- Koss J.E., Kirch D., Little E.P. Advantages of list-mode acquisition of dynamic cardiac data [ECG-gated nuclear medicine imaging]. *IEEE Transact. Nucl. Sci.* 1998; 44: 2431–8.
- Лишманов Ю.Б., Завадовский К.В., Ефимова И.Ю., Кривоногов Н.Г., Веснина Ж.В., Сазонова С.И. и др. Возможности ядерной медицины в диагностике сердечно-сосудистых заболеваний. *Сибирский медицинский журнал.* 2015; 2: 21–9. [Lishmanov Yu.B., Zavadovskiy K.V., Efimova I.Yu., Krivonogov N.G., Vesnina Zh.V., Sazonova S.I. et al. Prospects of nuclear medicine for the diagnosis of cardiovascular diseases. *Sibirskiy Meditsinskiy Zhurnal (Siberian*

- Medical Journal, Russian journal*). 2015; 2: 21–9 (in Russ.).]
16. Scanlon P.J., Faxon D.P., Audet A.-M. et al. ACC/AHA Guidelines for Coronary Angiography: Executive Summary and Recommendations. *Circulation*. 1999; 99: 2345–57.
 17. Hesse B., Tagil K., Cuocolo A. EANM/ESC procedural guidelines for myocardial perfusion imaging in nuclear cardiology. *Eur. J. Nucl. Med. Mol. Imag.* 2005; 32: 855–97.
 18. Лишманов Ю.Б., Ефимова И.Ю., Чернов В.И., Веснина Ж.В., Кривоногов Н.Г., Макарова Е.В. и др. Сцинтиграфия как инструмент диагностики, прогнозирования и мониторинга лечения болезней сердца. *Сибирский медицинский журнал*. 2007; 3: 74–7. [Lishmanov Yu.B., Efimova I.Yu., Chernov V.I., Vesnina Zh.V., Krivonogov N.G., Makarova E.V. et al. Scintigraphy as a tool of diagnosis, prevention and monitoring of cardiac diseases treatment. *Sibirskiy Meditsinskiy Zhurnal (Siberian Medical Journal, Russian journal)*. 2007; 3: 74–7 (in Russ.).]
 19. Henzlova M.J., Cerqueira M.D., Mahmarian J.J. et al. Stress protocols and tracers. *J. Nucl. Cardiol.* 2006; 6: 80–90.
 20. Le Guludec D., Lautamäki R., Knuuti J., Bax J.J., Bengel F.M. Present and future of clinical cardiovascular PET imaging in Europe – a position statement by the European Council of Nuclear Cardiology (ECNC). *Eur. J. Nucl. Med. Mol. Imag.* 2008; 35 (9): 1709–24.
 21. Melikian N., Bondt P., Tonino P. et al. Fractional flow reserve and myocardial perfusion imaging in patients with angiographic multivessel coronary artery disease. *JACC: Cardiovasc. Interv.* 2010; 3 (3): 307–14.
 22. Завадовский К.В., Гуля М.О., Саушкин В.В., Саушкина Ю.В., Лишманов Ю.Б. Совмещенная однофотонная эмиссионная и рентгеновская компьютерная томография сердца: методические аспекты. *Вестник рентгенологии и радиологии*. 2016; 97 (4): 235–42. [Zavadovsky K.V., Gulya M.O., Saushkin V.V., Saushkina Yu.V., Lishmanov Yu.B. Superimposed single-photon emission computed tomography and X-ray computed tomography of the heart: Methodical aspects. *Vestnik Rentgenologii i Radiologii (Russian Journal of Radiology)*. 2016; 97 (4): 235–42 (in Russ.).]

Поступила 22.04.2016

Принята к печати 13.05.2016